ЧУДОВИЩА ДОКТОРА ЭЙНШТЕЙНА

О ЧЕРНЫХ ДЫРАХ, БОЛЬШИХ И МАЛЫХ

КРИС ИМПИ

АНФ
АЛЬПИНА НОН-ФИКШН

Книжные проекты
Дмитрия Зимина

SHOUT
SHARE
IT

Annotation

Наши представления о черных дырах чаще всего основываются на популярных мифах и нескольких общеизвестных научных фактах. Описывая историю исследования черных дыр, Крис Импи с легкостью развенчивает наиболее распространенные заблуждения и приоткрывает дверь в загадочный мир далеких звезд и их невидимых, но влиятельных спутниц. История астрофизики предстает как череда потрясающих открытий, сделанных несколькими поколениями увлеченных и талантливейших ученых, сумевших описать прошлое, настоящее и будущее космического пространства, вычислить приблизительное местоположение ближайших черных дыр и предположить, что ждет Вселенную через миллионы лет. Живое, увлекательное повествование и подробные объяснения делают книгу понятной для любого читателя – от ученого-физика до школьника.

- Крис Импи
  - ○
  - ○
  - ○
  - ○ Предисловие
  - ○ Часть I. Свидетельства существования черных дыр, больших и маленьких
    - ■
    - ■ 1. Сердце тьмы
      - ■
      - ■ Английский священник выдумывает темные звезды
      - ■ Вклад великого французского математика
      - ■ Понимание ткани пространства и времени
      - ■ Сингулярность и внезапно прерванная жизнь
      - ■ Повелитель сжатий и расширений
      - ■ Поиск названия для непостижимого
      - ■ Гений сражается с гравитацией и болезнью
      - ■ Пари о черных дырах
      - ■ Золотой век теории черных дыр
    - ■ 2. Черные дыры, рожденные смертью звезд
      - ■
      - ■ Силы света и тьмы
      - ■ Гравитация и тьма окончательно побеждают

- Поиски первого черного лебедя
- Как взвесить невидимого партнера по вальсу
- Подлинные черные дыры
- Использование гравитационной оптики
- Физика на краю Мальстрема
- Экскурсия в бестиарий двойных звезд

- 3. Сверхмассивные черные дыры
  -
  - Единственный радиоастроном в мире
  - Галактики с яркими ядрами
  - Радиоастрономия достигает зрелости
  - Астроном из Нидерландов открывает квазары
  - Астрономы коллекционируют далекие светящиеся точки
  - Выдвижение гипотезы о массивных черных дырах
  - Картирование радиоджетов и лепестков
  - «Зоопарк» активных галактик
  - Вопрос восприятия
- 4. Гравитационные двигатели
  -
  - Большая черная дыра по соседству
  - Звезды на краю бездны
  - Темное ядро в каждой галактике
  - Рис, барон из Ладлоу, укрощает чудовище
  - Как изучать Вселенную с помощью квазаров
  - Черные дыры: счет на тысячи
  - Энергия аккреции в космосе
  - Массивные черные дыры – не страшные

○ Часть II. Черные дыры: прошлое, настоящее и будущее

-
- 5. Жизнь черных дыр
  -
  - Семена Вселенной
  - Первый свет и первая тьма
  - Рождение черной дыры в звездном катаклизме
  - Поиск недостающих звеньев
  - Компьютерное моделирование экстремальной гравитации
  - Как растут черные дыры и галактики

        - Вселенная как черная дыра
        - Лабораторная черная дыра
    - 6. Черные дыры как проверка теории гравитации
        -
        - Гравитация от Ньютона до Эйнштейна и далее
        - Как черные дыры влияют на пространство-время
        - Как черные дыры влияют на излучение
        - По ту сторону железного занавеса
        - Рентгеновское мерцание на краю бездны
        - Когда черная дыра съедает звезду
        - Swift J1644+57: возникновение релятивистского джета
        - Вращение черной дыры
        - Телескоп горизонта событий
    - 7. Учимся смотреть глазами гравитации
        -
        - Видеть Вселенную по-новому
        - Колебания пространственно-временного континуума
        - Эксцентричный миллионер и инженер-одиночка
        - Когда сталкиваются черные дыры
        - Самый точный прибор в истории
        - Познакомьтесь с мастером гравитации
        - Взгляд на Вселенную глазами гравитации
        - Столкновения и слияния массивных черных дыр
        - Гравитация и Большой взрыв
    - 8. Судьба черных дыр
        -
        - Новая эпоха изучения гравитации
        - Квазар у нас под боком
        - Слияние с Андромедой
        - Самые большие черные дыры во Вселенной
        - Эра звездных остатков
        - Будущее испарение и распад
        - Жизнь среди черных дыр
  - Благодарности
- notes
  - 1
  - 2
  - 3

- ○ 4
- ○ 5
- ○ 6
- ○ 7
- ○ 8
- ○ 9
- ○ 10
- ○ 11
- ○ 12
- ○ 13
- ○ 14
- ○ 15
- ○ 16
- ○ 17
- ○ 18
- ○ 19
- ○ 20
- ○ 21
- ○ 22
- ○ 23
- ○ 24
- ○ 25
- ○ 26
- ○ 27
- ○ 28
- ○ 29
- ○ 30
- ○ 31
- ○ 32
- ○ 33
- ○ 34
- ○ 35
- ○ 36
- ○ 37
- ○ 38
- ○ 39
- ○ 40
- ○ 41
- ○ 42
- ○ 43
- ○ 44
- ○ 45
- ○ 46
- ○ 47

- ○ 48
- ○ 49
- ○ 50
- ○ 51
- ○ 52
- ○ 53
- ○ 54
- ○ 55
- ○ 56
- ○ 57
- ○ 58
- ○ 59
- ○ 60
- ○ 61
- ○ 62
- ○ 63
- ○ 64
- ○ 65
- ○ 66
- ○ 67
- ○ 68
- ○ 69
- ○ 70
- ○ 71
- ○ 72
- ○ 73
- ○ 74
- ○ 75
- ○ 76
- ○ 77
- ○ 78
- ○ 79
- ○ 80
- ○ 81
- ○ 82
- ○ 83
- ○ 84
- ○ 85
- ○ 86
- ○ 87
- ○ 88
- ○ 89
- ○ 90
- ○ 91

- ○ 92
- ○ 93
- ○ 94
- ○ 95
- ○ 96
- ○ 97
- ○ 98
- ○ 99
- ○ 100
- ○ 101
- ○ 102
- ○ 103
- ○ 104
- ○ 105
- ○ 106
- ○ 107
- ○ 108
- ○ 109
- ○ 110
- ○ 111
- ○ 112
- ○ 113
- ○ 114
- ○ 115
- ○ 116
- ○ 117
- ○ 118
- ○ 119
- ○ 120
- ○ 121
- ○ 122
- ○ 123
- ○ 124
- ○ 125
- ○ 126
- ○ 127
- ○ 128
- ○ 129
- ○ 130
- ○ 131
- ○ 132
- ○ 133
- ○ 134
- ○ 135

- ○ 136
- ○ 137
- ○ 138
- ○ 139
- ○ 140
- ○ 141
- ○ 142
- ○ 143
- ○ 144
- ○ 145
- ○ 146
- ○ 147
- ○ 148
- ○ 149
- ○ 150
- ○ 151
- ○ 152
- ○ 153
- ○ 154
- ○ 155
- ○ 156
- ○ 157
- ○ 158
- ○ 159
- ○ 160
- ○ 161
- ○ 162
- ○ 163
- ○ 164
- ○ 165
- ○ 166
- ○ 167
- ○ 168
- ○ 169
- ○ 170
- ○ 171
- ○ 172
- ○ 173
- ○ 174
- ○ 175
- ○ 176
- ○ 177
- ○ 178
- ○ 179

- ○ 180
- ○ 181
- ○ 182
- ○ 183
- ○ 184
- ○ 185
- ○ 186
- ○ 187
- ○ 188
- ○ 189
- ○ 190
- ○ 191
- ○ 192
- ○ 193
- ○ 194
- ○ 195
- ○ 196
- ○ 197
- ○ 198
- ○ 199
- ○ 200
- ○ 201
- ○ 202
- ○ 203
- ○ 204
- ○ 205
- ○ 206
- ○ 207
- ○ 208
- ○ 209
- ○ 210
- ○ 211
- ○ 212
- ○ 213
- ○ 214
- ○ 215
- ○ 216
- ○ 217
- ○ 218
- ○ 219
- ○ 220
- ○ 221
- ○ 222
- ○ 223

- ○ 224
- ○ 225
- ○ 226
- ○ 227
- ○ 228
- ○ 229
- ○ 230
- ○ 231
- ○ 232
- ○ 233
- ○ 234
- ○ 235
- ○ 236
- ○ 237
- ○ 238
- ○ 239
- ○ 240
- ○ 241
- ○ 242
- ○ 243
- ○ 244
- ○ 245
- ○ 246
- ○ 247
- ○ 248
- ○ 249
- ○ 250
- ○ 251
- ○ 252
- ○ 253
- ○ 254
- ○ 255
- ○ 256
- ○ 257
- ○ 258
- ○ 259
- ○ 260
- ○ 261
- ○ 262
- ○ 263
- ○ 264
- ○ 265
- ○ 266
- ○ 267

- ○ 268
- ○ 269
- ○ 270
- ○ 271
- ○ 272
- ○ 273
- ○ 274
- ○ 275
- ○ 276
- ○ 277
- ○ 278
- ○ 279
- ○ 280
- ○ 281
- ○ 282
- ○ 283
- ○ 284
- ○ 285
- ○ 286
- ○ 287
- ○ 288
- ○ 289
- ○ 290
- ○ 291
- ○ 292
- ○ 293
- ○ 294
- ○ 295
- ○ 296
- ○ 297
- ○ 298
- ○ 299
- ○ 300
- ○ 301
- ○ 302
- ○ 303
- ○ 304
- ○ 305
- ○ 306
- ○ 307
- ○ 308
- ○ 309
- ○ 310
- ○ 311

- ○ 312
- ○ 313
- ○ 314
- ○ 315
- ○ 316
- ○ 317
- ○ 318
- ○ 319
- ○ 320
- ○ 321
- ○ 322
- ○ 323
- ○ 324
- ○ 325
- ○ 326
- ○ 327
- ○ 328
- ○ 329
- ○ 330
- ○ 331
- ○ 332
- ○ 333
- ○ 334
- ○ 335
- ○ 336
- ○ 337
- ○ 338
- ○ 339
- ○ 340
- ○ 341
- ○ 342
- ○ 343
- ○ 344
- ○ 345
- ○ 346
- ○ 347
- ○ 348
- ○ 349
- ○ 350
- ○ 351
- ○ 352
- ○ 353
- ○ 354
- ○ 355

- ○ 356
- ○ 357
- ○ 358
- ○ 359
- ○ 360
- ○ 361
- ○ 362
- ○ 363
- ○ 364
- ○ 365
- ○ 366
- ○ 367
- ○ 368
- ○ 369
- ○ 370
- ○ 371
- ○ 372
- ○ 373
- ○ 374
- ○ 375
- ○ 376
- ○ 377
- ○ 378
- ○ 379
- ○ 380
- ○ 381
- ○ 382
- ○ 383
- ○ 384
- ○ 385
- ○ 386
- ○ 387
- ○ 388
- ○ 389
- ○ 390
- ○ 391
- ○ 392
- ○ 393
- ○ 394
- ○ 395
- ○ 396
- ○ 397
- ○ 398
- ○ 399

- ○ 400
- ○ 401
- ○ 402
- ○ 403
- ○ 404
- ○ 405
- ○ 406
- ○ 407
- ○ 408
- ○ 409
- ○ 410
- ○ 411
- ○ 412
- ○ 413
- ○ 414
- ○ 415
- ○ 416
- ○ 417
- ○ 418

Крис Импи
Чудовища доктора Эйнштейна: О черных дырах, больших и малых

* * *

Посвящается Дине, любимой и вдохновляющей

Книжные проекты
Дмитрия Зимина

Эта книга издана в рамках программы «Книжные проекты Дмитрия Зимина» и продолжает серию «Библиотека «Династия». Дмитрий Борисович Зимин – основатель компании «Вымпелком» (Beeline), фонда некоммерческих программ «Династия» и фонда «Московское время».

Программа «Книжные проекты Дмитрия Зимина» объединяет три проекта, хорошо знакомые читательской аудитории: издание научно-популярных переводных книг «Библиотека «Династия», издательское направление фонда «Московское время» и премию в области русскоязычной научно-популярной литературы «Просветитель».

Подробную информацию о «Книжных проектах Дмитрия Зимина» вы найдете на сайте ziminbookprojects.ru.

О звезды, с неба не струите света
Во мрак бездонный замыслов Макбета![1]

Уильям Шекспир. Макбет. Акт 1, сцена 4

Предисловие

Черные дыры – самые известные и самые загадочные объекты Вселенной. Используя этот термин в обычной жизни, мы представляем нечто втягивающее в себя все вокруг. О черных дырах говорят в фильмах и романах, этот образ освоила и поп-культура. Черная дыра стала олицетворением тайны – зловещей тайны. Я метафорически называю их «чудовища Эйнштейна». Это мощные силы, не подвластные никому. Черные дыры придумал не Эйнштейн, но именно он предложил лучшую на сегодняшний день теорию гравитации, которую мы используем для того, чтобы понять их суть[2].

Распространенное среди большинства людей понимание черных дыр в корне неверно. Это не космические пылесосы, поглощающие все вокруг. Черные дыры лишь искривляют пространство и время в непосредственной близости у горизонта событий. На черные дыры приходится малая доля массы Вселенной, и ближайшие находятся в квинтиллионах километров от нас. Едва ли их можно использовать для путешествий во времени или полетов в другие вселенные. Мало того, черные дыры – даже не черные! Они испускают поток излучения и элементарных частиц и, по сути, являются частями бинарных систем, в которых газ, падающий в черную дыру, нагревается и ярко светится. Черные дыры необязательно опасны. Оказавшись в центре одной из многочисленных галактик, вы провалитесь в черную дыру и, скорее всего, ничего не почувствуете, хотя вряд ли вам удастся рассказать об увиденном.

Эта книга познакомит вас с черными дырами, большими и малыми. Черные дыры кажутся простыми объектами, но математика, необходимая для их понимания, невероятно сложна. Мы познакомимся с учеными, рассказавшими человечеству о черных дырах: от смелых мыслителей прошлого, которые сотни лет назад задумались о существовании черных звезд, до физиков, ломающих голову над общей теорией относительности – и не только.

Понять, что такое черные дыры, невозможно без общей теории относительности Эйнштейна, разработанной более 100 лет назад. Согласно этой теории, пространство и время искривляются материей. В случаях экстремально высокой концентрации массы область пространства буквально «выдавливается» из Вселенной и ничто не может прорваться наружу, даже свет. Это и есть черные дыры. Однако сам Эйнштейн сомневался в их реальности. И не он один – многие

выдающиеся физики оспаривали их существование.

Тем не менее они существуют. В течение 40 лет накапливались доказательства того, что никакие силы природы не могут противостоять гравитационному коллапсу ядра умершей массивной звезды. Газовый шар – в десятки раз больше Солнца – схлопывается в темный объект размером с небольшой городишко. Не так давно выяснилось, что в центре каждой галактики имеется массивная черная дыра – массы таких дыр могут различаться в миллиарды раз.

Изучая «места обитания» черных дыр, мы познакомимся с бинарными системами, где черная дыра кружится в гравитационном вальсе с нормальной звездой. Мы узнаем, что самое убедительное доказательство существования черных дыр находится в центре нашей Галактики, где десятки звезд роятся, как разъяренные пчелы, вокруг темного объекта весом 4 млн солнечных масс. Когда массивные черные дыры, имеющиеся во всех галактиках, выходят из спячки и начинают расти, их видно с расстояния в миллиарды световых лет. Эти гравитационные механизмы являются самыми мощными источниками излучения во Вселенной.

Недавно физики научились смотреть «глазами гравитации», регистрируя гравитационные волны. При столкновении две черные дыры вызывают колебания пространственно-временного континуума, распространяющиеся повсюду со скоростью света и несущие информацию о случившейся катастрофе. Появился новый метод изучения черных дыр – как и любых других ситуаций, для которых характерна сильная и изменчивая гравитация. Существование гравитационных волн доказывает – если вам еще нужны какие-то доказательства – тот факт, что природа создает черные дыры. Каждые пять минут где-то во Вселенной сливается пара черных дыр, и гравитационные волны распространяются по космосу.

Наши знания о черных дырах все еще довольно скудны. Эти объекты продолжают изумлять и восхищать нас. Благодаря черным дырам появляются новые способы проверки общей теории относительности. Никто не знает, подтвердится ли в итоге теория – или будет опровергнута. Вопросы, касающиеся потери информации в черных дырах, ее возможного кодирования на горизонте событий вызывают яростные споры. С помощью черных дыр физики-теоретики надеются подтвердить теорию струн, завершить наконец попытку Эйнштейна объединить квантовую механику и общую теорию относительности.

Книга состоит из двух частей. В первой рассматриваются доказательства существования черных дыр всех размеров: от тех,

что слегка больше Солнца, до гигантов массой с небольшую галактику. Вторая часть рассказывает о том, как рождаются и умирают черные дыры. В ней также приведено объяснение того, насколько применимы к небесным объектам наши теории природы. Рассказы о черных дырах перемежают и некоторые частные истории, в том числе и мои собственные, и их цель – напомнить нам, что ученые – это люди из плоти и крови, со своими недостатками и слабостями. Описываемая мною область науки стремительно развивается. И потому некоторые изыскания, приведенные в этой книге, могут не выдержать испытания временем. По этой причине могут возникнуть ошибки, упущения и неверные сведения – и я отношу их исключительно на свой счет.

Можно представить, что разумные жители миллиардов обитаемых миров логически пришли к выводу о существовании черных дыр. Возможно, некоторые научились создавать их и пользоваться их энергией. Мы, люди, хоть и молодой биологический вид, но с гордостью причисляем себя к избранным, постигшим тайны черных дыр.

Крис Импи,

Таксон, Аризона,

апрель 2018 г.

Часть I. Свидетельства существования черных дыр, больших и маленьких

Откуда ученые взяли идею черной дыры? В этой части книги мы рассмотрим, как развивалась научная мысль: начнем с ньютоновской теории гравитации и продолжим обсуждение теории общей относительности Эйнштейна. Сегодня мы знаем, что у черной дыры есть два основных компонента: горизонт событий, действующий как информационный барьер, и сингулярность – центральная точка бесконечной плотности вещества. Многие выдающиеся физики, включая самого Эйнштейна, противились самой мысли о столь причудливом состоянии материи. Но тем не менее было доказано, что ядро массивной звезды может коллапсировать до плотности, не пропускающей ни частицы, ни излучение.

Если бы физики-теоретики довольствовались красотой математического аппарата общей теории относительности, они не сомневались бы в существовании черных дыр. Однако наука эмпирична. Астрономы решили выследить этого неуловимого зверя. Но только после появления рентгеновской астрономии – и спустя десятилетие после смерти Эйнштейна – ученые сумели разглядеть горячий аккреционный диск и двойные релятивистские джеты, образующиеся при поглощении черной дырой газа из окружающего пространства Вселенной. Сложно охотиться за мертвыми темными звездами. За 50 лет работы удалось обнаружить лишь три десятка остатков звезд, которые однозначно можно считать черными дырами. Это ближайшие из предположительно десяти миллионов черных дыр, разбросанных по галактике Млечный Путь. И такие свидетельства копились и систематизировались – в итоге астрономы пришли к удивительному открытию: оказалось, что в центрах галактик прячутся массивные черные дыры. И, поглощая материю, они становятся самыми яркими объектами во Вселенной.

1. Сердце тьмы

Ученые – оптимисты. Они верят в предсказательную силу теорий, например теории относительности и естественного отбора. Они полагают, что стремительное развитие физики, астрономии и биологии – чему мы были свидетелями в течение нескольких десятилетий – продолжится и тогда наука сможет объяснить непознанное в мире природы.

Но что, если на пути ученых возникнет непреодолимое препятствие? Возможно ли, чтобы космос прятал от нашего пытливого взгляда, допустим, криптообъекты? Более того, что, если таинственные сущности, о которых мы имеем представление благодаря выдающимся теориям в сфере физики, продемонстрировали бы свойства, ставящие под сомнение верность этих теорий? Добро пожаловать в мир черных дыр.

Английский священник выдумывает темные звезды

По воспоминаниям современников, Джон Мичелл был «маленьким, толстым темнолицым коротышкой». Большую часть сознательной жизни он прослужил приходским священником в маленьком городке на севере Англии. Однако в его доме часто бывали знаменитые мыслители той эпохи, такие как Джозеф Пристли, Генри Кавендиш и Бенджамин Франклин, поскольку Мичелл был к тому же разносторонним и успешным ученым. История недооценила этого скромного человека, жившего тихой жизнью священника.

В Кембриджском университете Мичелл изучал – а позднее и преподавал – математику, а также древнегреческий и древнееврейский языки. Он заложил основы сейсмологии, выдвинув предположение, что землетрясения в толще Земли распространяются в виде волн. Это открытие стало для него пропуском в Королевское научное общество. Именно Мичелл разработал оборудование для эксперимента, впоследствии позволившее Генри Кавендишу измерить гравитационную постоянную – фундаментальную физическую константу, лежащую в основе любых расчетов силы гравитации. Мичелл же первым применил статистические методы в астрономии в попытке доказать, что многие наблюдаемые пары и группы звезд связаны физически, а не просто случайно оказались рядом на ночном небе[3].

В полную силу научное провидение Мичелла реализовалось в его предположении, что некоторые звезды имеют мощнейшую

гравитацию – непреодолимую даже для света. Он описал эту идею в статье 1784 г. с неудобочитаемым названием «О средствах открытия удаленности, величины и прочего неподвижных звезд посредством уменьшения скорости их света в случае, если будет обнаружено, что таковое уменьшение имеет место для любой из них, и если будут получены путем наблюдения другие данные, потребные для этой цели»[4].

Для пересказа статьи понадобится немногим больше слов, чем использовано в ее названии. Мичелл принял идею второй космической скорости и тот факт, что она определяется массой и размером звезды. Как и Исаак Ньютон, он полагал, что свет – это частица, и, решив, что свет замедляется гравитацией звезды, он задумался: что, если звезда настолько массивна, а ее гравитация настолько сильна, что вторая космическая скорость равна скорости света? На основе этого Мичелл предположил, что существует множество «темных звезд», которые невозможно обнаружить, потому что их не покидает свет[5].

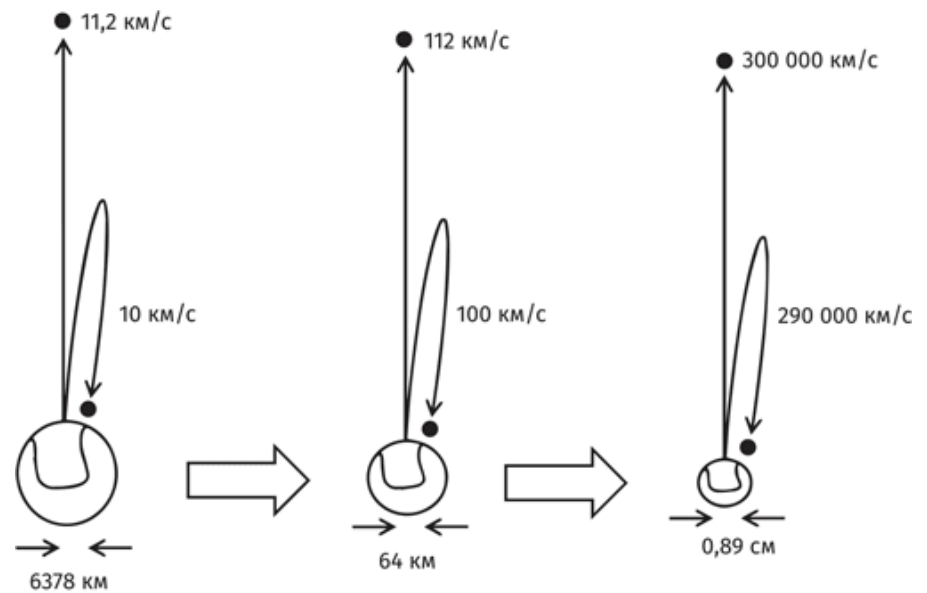
Рассуждения Мичелла были ошибочны – но только потому, что он работал с ньютоновской физикой. В 1887 г. Альберт Майкельсон и Эдвард Морли доказали, что свет всегда распространяется с одинаковой скоростью, независимо от движения Земли[6]. Лишь в 1905 г. Эйнштейн положил это открытие в основу своей специальной теории относительности, предположив, что скорость света не зависит от локальной силы гравитации. Ошибочным было и предположение Мичелла о том, что темные звезды в 500 раз больше Солнца, но имеют такую же плотность. Настолько массивных звезд просто не существует. Экстремальные эффекты гравитации проявляются лишь при высокой плотности, что случается, когда звезда типа Солнца сжимается до крошечных объемов.

Вклад великого французского математика

Спустя десятилетие после того, как Мичелл выдвинул свое предположение о темных звездах, французский ученый и математик Пьер-Симон Лаплас высказался на ту же тему в своей книге «Изложение системы мира»[7]. Лаплас был более известен, чем Мичелл, – он значился президентом Института Франции и советником Наполеона, удостоился титула графа, а затем маркиза. Как и Мичелл, Лаплас изучал теологию и происходил из религиозной семьи, но зов математики оказался сильнее зова Бога.

Лаплас, очевидно, не знал о работе Мичелла. В двухтомном труде по астрономии он кратко упоминает идею темной звезды,

и, по его мнению, гравитация этой гипотетической звезды намного сильнее, чем у Солнца: «…Следовательно, не исключено, что самые большие из светящихся тел являются по этой причине невидимыми». Коллега потребовал у Лапласа математическое доказательство этой гипотезы, и три года спустя, в 1799 г.[8], оно было представлено. Расчеты Лапласа – как и расчеты Мичелла – оказались ошибочными, причем по одной и той же причине. Самой плотной субстанцией, известной в те времена, было золото – в пять раз плотнее Земли и в 14 раз плотнее Солнца. Вероятно, ученый того времени с трудом мог представить, каким будет состояние в миллионы раз более плотной материи, а это необходимо для современного понимания черной дыры (илл. 1). В 1799 г. Томас Юнг сумел доказать, что свет ведет себя как волна, но то, что гравитация может замедлить волну, представлялось невероятным. Возможно, именно поэтому Лаплас исключил всякое упоминание о темных звездах из последующих изданий своей книги.



Илл. 1. Концепция черной дыры на основе теории гравитации Ньютона. Вторая космическая скорость для Земли равна 11 км/с; любой объект, запущенный с этой скоростью, преодолеет силу гравитации Земли. Если Земля сожмется в 100 раз, вторая космическая скорость увеличится до 110 км/с. Если бы Землю удалось сжать до радиуса 0,89 см, возникла бы черная дыра. Тогда вторая космическая скорость сравнялась бы со скоростью света. *Джон Д. Нортон / Питтсбургский университет*

Концепция черных дыр не могла появиться без новой теории гравитации. Теория Ньютона проста: пространство равномерно и линейно и простирается бесконечно во всех направлениях. Время равномерно и линейно и течет в бесконечное будущее. Пространство и время самостоятельны и независимы. Звезды и планеты движутся в пустом пространстве, управляемые силой, которая зависит от их масс и расстояний между ними. Такова красивая модель Вселенной Ньютона[9].

Ричард Уэстфолл, биограф Ньютона, и сам был блестящим ученым. Он сказал: «Окончательный результат моего изучения Ньютона привел меня к убеждению, что к нему неприменима никакая мерка. Он стал для меня совершенно особым человеком, одним из малого числа величайших гениев, определивших категории человеческого интеллекта, человеком, неподвластным критериям, по которым мы оцениваем своих ближних»[10]. Однако даже Ньютон – со своим исключительным мышлением – не сумел до конца разгадать загадку гравитации. Он не мог объяснить, каким образом она работает в вакууме, будучи невидимой и действуя мгновенно. Ньютон признал это в своем великом труде о гравитации «Математические начала натуральной философии» (1687)[11]: «Я не смог обнаружить причины этих свойств гравитации в наблюдаемых феноменах, и я не формулирую никакой гипотезы».

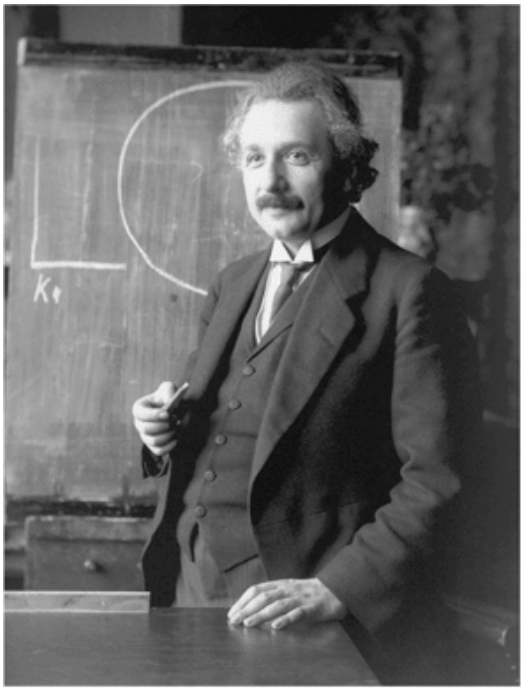
Понимание ткани пространства и времени

Альберт Эйнштейн, 26-летний клерк патентного бюро в Берне, опроверг систему Ньютона. В 1905 г. Эйнштейн написал четыре статьи, которым суждено было изменить устоявшиеся представления о физике[12]. В одной из статей он рассмотрел фотоэлектрический эффект – высвобождение электронов под воздействием солнечного света на вещество. Он утверждал, что свет ведет себя как частица, перенося энергию дискретными порциями – квантами. Именно эта работа принесла Эйнштейну Нобелевскую премию, а не его более знаменитые теории относительности (илл. 2). Эксперименты Томаса Юнга и других ученых достоверно подтвердили, что для света характерны явления дифракции и интерференции, и физикам пришлось согласиться с тем, что свет одновременно подобен и волне, и частице.

В другой небольшой статье было предложено самое краткое уравнение физики: $E = mc^2$. Это означает, что масса и энергия эквивалентны и взаимозаменяемы. Поскольку скорость света c очень велика, крохотная масса может быть превращена в

колоссальную энергию. Масса представляет собой своего рода «замороженную» форму энергии – этим объясняется невероятная мощь ядерного оружия. И наоборот, энергии соответствует крохотная эквивалентная масса. Согласно этому уравнению, фотоны действительно могут испытывать влияние гравитации.

В третьей статье изложена специальная теория относительности. Теория строится на идее Галилея, гласящей, что законы природы должны быть одинаковыми для всех наблюдателей, движущихся с постоянной скоростью относительно друг друга. Эйнштейн добавляет второе положение: скорость света не зависит от движения наблюдателя. Второе положение является фундаментальным, в подтверждение его можно провести мысленный эксперимент[13]. Вы направляете свет фонарика в сторону человека, находящегося очень далеко от вас. Он отмечает, что фотоны движутся к нему со скоростью 300 000 км/с – скоростью света. Предположим, теперь вы мчитесь навстречу ассистенту со скоростью, равной половине скорости света. Он по-прежнему будет наблюдать фотоны, движущиеся со скоростью света, а не со скоростью 450 000 км/с. Теперь предположим, что вы удаляетесь с той же огромной скоростью, – и снова наблюдаемые фотоны летят со скоростью света, а не со скоростью 150 000 км/с. Свет не подчиняется простой арифметике. Скорость света – универсальная постоянная, что подразумевает весьма важные выводы. Скорость есть расстояние, деленное на время; если скорость постоянна, то пространство и время должны изменяться. Когда объекты перемещаются очень быстро и приближаются к скорости света, они сжимаются в направлении движения и их время замедляется. Теория Эйнштейна утверждает, что свет – самое быстрое, что есть во Вселенной, и из этого следует, что объекты становятся массивнее, приближаясь к скорости света, что увеличивает их инерцию, вследствие чего они так и не смогут достичь или превзойти скорость света.

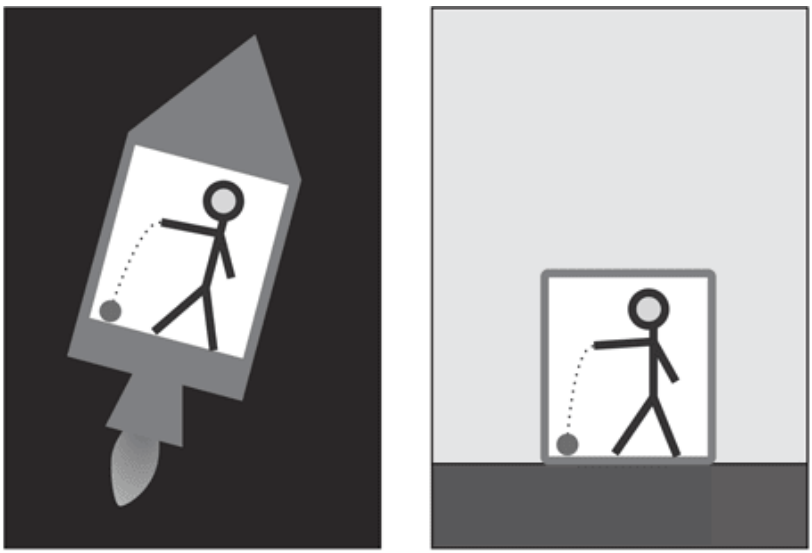


Илл. 2. Альберт Эйнштейн в 1921 г., через пять лет после опубликования общей теории относительности. Его теория — радикальный прорыв после ньютоновской гравитации, опирающейся на линейный и абсолютный характер пространства и времени. В общей теории относительности пространственно-временной континуум искривляется находящимися в нем массой и энергией. *Фердинанд Шмутцер*

Но даже столь блестящая работа была для Эйнштейна лишь разминкой перед эпохальным трудом – общей теорией относительности. Общая теория позволила ученому перейти от идеи постоянного движения к движению с ускорением с учетом гравитации, отталкиваясь от другой догадки Галилея. Энциклопедист эпохи Возрождения доказал, что все объекты падают с одной и той же скоростью, независимо от массы. Это значит, что инертная масса (сопротивление объекта изменению его движения) равна гравитационной массе (тому, как объект реагирует на силу гравитации). Для Галилея это было случайным и необъяснимым совпадением, в котором Эйнштейн усмотрел ключ к новому пониманию гравитации.

Представьте, что находитесь в закрытом лифте, стоящем на первом этаже. Вы ощущаете свой нормальный вес; любой предмет, который вы уроните, ускорится до 9,8 м/с^2. Так работает гравитация. Теперь представьте себя в герметичном ящике в космосе (внутри он выглядит как кабина лифта), которому космический корабль придал ускорение в 9,8 м/с^2. В одной ситуации участвует гравитация, в другой – нет, но Эйнштейн понял, что никакой эксперимент не позволит их различить (илл. 3). Рассмотрим еще две ситуации. В одной вы заперты внутри лифта в глубоком космосе – вы парите в кабине в невесомости. В другой – лифт находится в высоком здании и после обрыва троса вертикально падает на дно лифтовой шахты. Эти две ситуации

также невозможно отличить друг от друга. Гравитация неотличима от любой другой силы. Этот «принцип эквивалентности» является центральным в общей теории относительности Эйнштейна. Оказаться в оборвавшемся лифте, стремительно несущемся к земле, – катастрофа, но для Эйнштейна мысль о том, что падающий человек не почувствует своего веса, стала «счастливейшей».



Илл. 3. В общей теории относительности нет разницы между ускорением под воздействием гравитации и ускорением под воздействием любой другой силы. Человек в ракете, набравшей в глубоком космосе ускорение 9,8 м/с/с (слева), будет чувствовать себя так же, как при земной гравитации, и не заметит разницы в поведении падающих объектов по сравнению с ситуацией, когда он находится в покое на поверхности Земли. *Маркус Пёссель*

Новая концепция гравитации Эйнштейна является геометрической. Уравнения общей теории относительности в определенной области соотносят массу и энергию с искривлением пространства. Плоское линейное пространство Ньютона с находящимися в нем объектами заменяется пространством, которое искривлено находящимися в нем объектами (илл. 4)[14]. Пространство и время связаны, следовательно, гравитация может искажать и время, и пространство. Физик Джон Уилер, который, как мы в дальнейшем узнаем, ввел термин «черная дыра», нашел лаконичную формулировку: «Материя указывает пространству, как

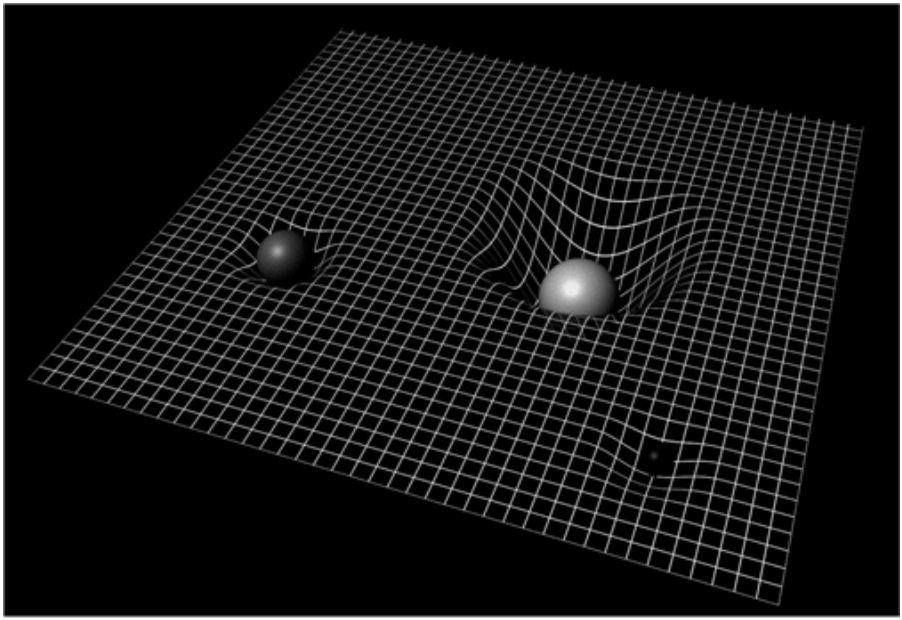
искривляться. Пространство указывает материи, как двигаться». Эта идея отражена и в словах поэта Роберта Фроста, который неоднозначно воспринял открытия теории относительности. В сонете «Нам по сердцу любая геометрия» он приходит в ужас при мысли о бесконечности космоса, но искривление, характеризующее черную дыру, видится ему утешением:

> *Там мрак и холод – настоящий ад,*
> *особенно рукам, пока раздельны.*
> *Будь эта даль хоть чуть искривлена,*
> *так руки – вместе – грелись бы, как братья.*
> *Упрямая теория вредна*
> *и не велит схватить себя в объятья*[15][16].

Три эффекта общей теории относительности напрямую соотносятся с ситуациями, когда речь идет о плотной материи, то есть о черных дырах. *Первый эффект* – отклонение света в соответствии с волнистой структурой пространства-времени, что обусловлено концентрацией массы. Это стало первой и классической проверкой общей теории относительности Эйнштейна в 1919 г., через три года после публикации. Группа под руководством великого английского астрофизика Артура Эддингтона измерила слабое искривление света звезды, проходящего вблизи края диска Солнца. Измерение не было особенно точным, но подтверждение теории относительности сделало Эйнштейна знаменитым и вознесло его на вершины науки. В 1995 г. более точное измерение дало результат, совпавший с предсказанием Эйнштейна с точностью до 0,01 %[17].

Второй эффект – потеря энергии по мере того, как свет покидает массивный объект, так называемое гравитационное красное смещение. Это выглядит так, как если бы фотоны боролись с гравитацией. Эффект был впервые измерен экспериментальным путем в 1960 г. Непосредственное отношение ко второму имеет и *третий эффект* – замедление времени. Предполагается, что при более сильной гравитации часы идут медленнее. Замедление времени было впервые зарегистрировано в 1971 г.: выяснилось, что атомные часы, перемещаемые на самолете с высокой скоростью, идут чуть быстрее точно таких же атомных часов, оставленных на земле. В 2010 г. замедление времени было зарегистрировано при разнице положения по вертикали всего один метр, для чего потребовались часы исключительной точности, с погрешностью в одну секунду за 4 млрд лет[18]. Измерения эффекта замедления времени также согласуются с предсказаниями теории с точностью 0,01 %. Общая

теория относительности блестяще выдержала все экспериментальные проверки.



Илл. 4. В теории относительности Эйнштейна пространство искривлено присутствующей в нем массой, что здесь проиллюстрировано двумерной аналогией: кривизна возрастает с массой. Черная дыра представляет ситуацию, когда пространство-время «выдавлено» из остальной Вселенной. В случае с обычными звездами и планетами искривление пространства почти неразличимо. *ESA/Кристоф Каро*

Общая теория относительности кажется тайным знанием, оторванным от повседневной жизни, но, если бы расчеты не учитывали замедление времени, мы вряд ли могли пользоваться системами GPS. Для установления местонахождения телефона на Земле в пределах метра нужны предельно точные данные орбитальных спутников, на борту которых установлены атомные часы[19]. Релятивистские расчеты выполняются компьютерными чипами в мобильном телефоне, без таких корректировок отклонения систем GPS достигали бы 10 км за день. Эффекты относительности малозаметны в Солнечной системе и везде, где гравитация слаба, но, как мы скоро узнаем, невероятно усиливаются при коллапсе звезд и сильной гравитации.

Сингулярность и внезапно прерванная жизнь

Общая теория относительности строга и красива. Эйнштейн сказал о своем творении: «Едва ли кто-нибудь, полностью понимающий эту теорию, может устоять перед ее обаянием»[20]. Однако лишь немногие способны постичь теорию относительности – для этого нужны фундаментальные знания математики. В самом кратком выражении в одном уравнении соотносятся плотность массы-энергии и искривление пространства-времени. Это все равно что сыграть пьесу Шекспира за пять минут. Полноценная «театральная постановка» – система из десяти нелинейных гиперболическо-эллиптических дифференциальных уравнений в частных производных. Опорная математика основывается на многообразиях, сложных многомерных формах, которые соотносятся с евклидовым пространством, как сложенная фигурка дракона-оригами с плоским листом бумаги[21].

Эйнштейн разработал приблизительные решения для своей теории, что позволило Артуру Эддингтону организовать экспедицию для измерения гравитационного искривления света звезды во время солнечного затмения. Он сомневался, что уравнения имеют точное решение, но общая теория относительности сразу привлекла внимание выдающихся ученых-физиков. Один из ученых добился поразительных результатов. Уроженец Франкфурта Карл Шварцшильд стал студентом уже в 16 лет – и тогда же опубликовал две статьи об орбитах двойных звезд. Вскоре он получил должность профессора и директора обсерватории Гёттингенского университета. Когда началась Первая мировая война, ему было больше 40 лет, но в порыве патриотизма он завербовался в армию Германии. Шварцшильд воевал на западном и восточном фронтах и дослужился до лейтенанта артиллерии.

Страдая от тяжелой простуды на русском фронте в конце 1915 г., Шварцшильд переписывался с Эйнштейном. «Война была ко мне довольно милостива, – писал Шварцшильд, – несмотря на канонаду, я мог себе позволить отрешиться от происходящего и предпринять вылазку в сферу ваших идей»[22]. Он предложил верное решение уравнений, что весьма впечатлило Эйнштейна. Вскоре после этого Шварцшильд был представлен Академии наук Германии. Но ученый не смог продвинуть свои идеи: этому помешала редкая и мучительная болезнь кожи – пузырчатка. Шварцшильд представил статью к публикации в феврале 1916 г., был комиссован с русского фронта в марте и умер в мае.

Что же за решение нашел Шварцшильд? Оно звучало так: вторая космическая скорость на поверхности тела зависит от его массы и радиуса. Мичелл и Лаплас размышляли о возможности

попадания света в ловушку большой массивной звезды с той же плотностью, что и у Солнца. Шварцшильд понял, что вторая космическая скорость также может достичь скорости света, если звезда, подобная Солнцу, коллапсирует до высокой плотности. Его решение подразумевало два удивительных момента: что гравитация может сжать тело до состояния бесконечной плотности вещества, которое называется сингулярностью, и что существует гравитационный предел, навсегда заключающий в ловушку все, что находилось внутри, так называемый горизонт событий. Сингулярность и горизонт событий – две важнейшие характеристики черной дыры (илл. 5).

сингулярность
горизонт событий
даже свет не может вырваться отсюда
здесь тела ощущают гравитацию черной дыры, но свет еще может ее преодолеть

Илл. 5. Черные дыры — это простые объекты, характеризующиеся массой и осевым вращением. Горизонт событий — информационный барьер, разделяющий области пространственно-временного континуума, которые мы можем и не можем видеть. Сингулярность в центре черной дыры — это точка бесконечной плотности вещества. *Моника Тернер / Science in School / EIROforum*

Повелитель сжатий и расширений

Эйнштейн был недоволен. И он, и Эддингтон были убеждены, что сингулярность является следствием несовершенного понимания физики. Это же бессмыслица – физический объект нулевого размера и бесконечной плотности. Теория Эйнштейна породила чудовище. Другие физики сочли решение Шварцшильда игрой ума для посвященных. Для таких звезд, как Солнце, радиус Шварцшильда – размер горизонта событий – составляет 3 км. Как может звезда диаметром 1,4 млн км – в 100 раз больше Земли – сжаться до размера деревни?

Но еще один вундеркинд от физики был убежден, что это возможно. Роберт Оппенгеймер родился в Нью-Йорке, изучал физику в Гарварде. Получив степень доктора философии, он

проехал по Европе и весьма увлекся новым направлением – квантовой механикой. Его научные интересы были разносторонни. В числе прочих достижений Оппенгеймер первым применил квантовую теорию на молекулярном уровне, предсказал антиматерию и стал пионером в разработке теории космических лучей, именно он создал и лучшую программу преподавания теоретической физики в Калифорнийском университете в Беркли. Оппенгеймер был человеком высокой культуры: серьезно интересовался изобразительным искусством и музыкой, изучал санскрит и в подлиннике читал древнегреческих философов. Он был склонен к левым убеждениям и обладал высокой социальной ответственностью[23].

Оппенгеймер разработал инструменты для понимания ядерной материи: он понял, что в астрофизике реальный мир принимает экзотические формы. Эволюционируя, звезда сохраняет тонкое равновесие между гравитацией, которая всегда «тянет» внутрь, и давлением, которое порождается реакциями термоядерного синтеза и всегда направлено наружу. Солнце стабильно и имеет постоянный размер до тех пор, пока в нем продолжаются термоядерные реакции. Когда Солнце израсходует водородное топливо, оно сожмется до плотного состояния материи, поддерживаемого квантово-механической силой – давлением вырожденного газа, и станет белым карликом.

Индийский астрофизик Субраманьян Чандрасекар вычислил, что гравитация более массивной, чем Солнце, звезды может преодолеть силу давления вырожденного газа и коллапсировать до плотности огромного атомного ядра. Такая звезда называется нейтронной. В 1939 г. Оппенгеймер вместе с одним из своих магистрантов написал статью «О безграничном гравитационном сжатии»[24], в которой путем сложных расчетов доказал, что еще более массивная звезда будет коллапсировать до тех пор, пока не достигнет большей плотности, чем у любой известной формы вещества[25]. В конце жизни массивной звезды неизбежно формируется черная дыра.

В 1942 г. Оппенгеймера назначили руководителем американской программы по созданию атомной бомбы. Для работы на секретном объекте в Лос-Аламосе, что в северной части Нью-Мексико, он собрал великолепную команду талантливых физиков, которые бросили все усилия на достижение решающего преимущества в войне с Японией[26]. Оппенгеймер был предан работе, но в его душе зрел конфликт. Став свидетелем «Тринити» – испытания первой атомной бомбы в 1945 г., он лишь сказал своему брату: «Сработало». Позже Оппенгеймер выбрал знаменитую строчку из Бхагавадгиты: «Я смерть, разрушитель

миров»[27]. После войны из-за политических взглядов положение Оппенгеймера пошатнулось. Он стал жертвой унизительной антикоммунистической «охоты на ведьм» и был лишен допуска к секретной информации. Оппенгеймер так и не сумел восстановить репутацию. Перевод черных дыр из сферы умозрительного в сферу достоверного – это одно из выдающихся достижений в его колоссальном научном наследии.

Поиск названия для непостижимого

Физики не всегда соглашаются друг с другом. Величайшие ученые вступают в яростное соперничество, ими движет страсть к познанию законов природы. Я был свидетелем горячих споров в моей области науки, порой я вздрагивал, слыша, какими ужасными словами ученые называли друг друга. Как правило, лучшие идеи находят подтверждение, а обиды забываются. Но иногда – как в случае Роберта Оппенгеймера и Джона Уилера, который ввел в научный обиход термин «черная дыра» (илл. 6), – споры перерастают в личные конфликты.

Уилер – ученик великого датского физика Нильса Бора, который привил ему привычку не только справляться со сложными уравнениями, но и формулировать фундаментальные вопросы о природе реальности, которую изучает физика. Уилер работал над диссертацией (в дальнейшем не стал ее защищать) в Беркли под руководством Оппенгеймера – тот был всего на семь лет старше. Большую часть своей научной карьеры Уилер прослужил профессором в Принстоне, под его руководством работали многие выдающиеся физики второй половины XX в. Во многом благодаря ему изучение гравитации стало полноправной дисциплиной. В 1973 г., незадолго до выхода на пенсию, Уилер в соавторстве с двумя бывшими студентами написал фундаментальный учебник «Гравитация», по которому до сих пор учатся магистранты-физики[28].

В 1939 г., в тот же день, когда в свет вышла статья Оппенгеймера о коллапсе звезд, Уилер и Бор опубликовали свое объяснение процесса деления атомного ядра, – в это время в Европе Гитлер вторгся в Польшу. Как и его предшественники Эйнштейн и Эддингтон, Уилер отвергал идею сингулярности – он тоже считал это насилием над физикой. Выступая на конференции в 1958 г., Уилер оспорил мысль Оппенгеймера, заявив, что она не дает приемлемого ответа. Последовала острая дискуссия. Оппенгеймер зачастую бывал нетерпим и вспыльчив, то и дело переходил на личности. И Уилер – искренний, увлеченный и заинтересованный в каждом человеке, с которым

его сводила судьба, – сказал об Оппенгеймере: «Я никогда по-настоящему его не понимал. Я всегда чувствовал, что с ним нужно держать ухо востро». (Уилер в итоге принял идею Оппенгеймера, после того как ее состоятельность подтвердилась с помощью компьютерных кодов, использованных для моделирования бомб, и высоко оценил его работу, выступая на конференции в 1962 г. Оппенгеймер, однако, не услышал слов одобрения, поскольку во время выступления Уилера находился за дверями конференц-зала, предпочтя беседу с коллегой[29].)

Илл. 6. Джон Арчибальд Уилер, один из знаменитых физиков второй половины XX в., автор классического учебника «Гравитация». Он ввел в научный обиход термин «черная дыра». *Управление государственных архивов, Центр американской истории Дольфа Бриско, Техасский университет в Остине*

Неприязнь росла, а во время войны расхождения лишь усилились. Оппенгеймер был главным научным руководителем атомной программы, положившей конец войне, но после он бросил все усилия на то, чтобы не допустить распространения ядерного оружия. Тем временем Уилер и Эдвард Теллер приступили к разработке еще более мощной водородной бомбы, которую назвали «супербомбой»[30]. Оппенгеймер критиковал их: «Пусть Теллер и Уилер продолжают. Не мешайте – пусть сядут в лужу»[31]. Однако этого не случилось, и впоследствии Оппенгеймер отметил их техническое мастерство, благодаря которому появилась термоядерная бомба. Уилер же пришел в отчаяние, узнав о гибели брата во время боевых действий в Италии в 1944 г. Он горько сожалел о том, что бомбу не создали ранее – это могло изменить ход войны в Европе.

Во время своей речи в 1967 г. Уилер отметил, что, многажды повторив выражение «полностью гравитационно коллапсировавшие тела», поневоле задумаешься о выборе нормального термина. Кто-то в аудитории (кто именно, так и не удалось установить) выкрикнул: «Как насчет черной дыры?» И Уилер начал использовать это выражение. Оно прижилось и вошло в научный оборот. Как и термин «Большой взрыв», предложенный кем-то посторонним, «черная дыра» – разговорное, но точное определение[32]. Как писал Уилер в автобиографии, черная дыра «говорит нам, что пространство может быть скомкано, как лист бумаги, в исчезающе малую точку, что время может угаснуть, как затушенное пламя, и что законы физики, которые мы считаем священными и незыблемыми, являются какими угодно, только не такими».

Гений сражается с гравитацией и болезнью

Стивен Хокинг – еще один блестящий ученый, взявшийся за тайну черных дыр. Его история настолько всем нам знакома, что мы практически перестали им восхищаться. Неуверенный в себе и посредственный ученик в детстве, он сумел окончить школу отличником, занимаясь не более часа в день в течение трех лет. В 21 год у Хокинга диагностировали боковой амиотрофический склероз – прогрессирующую мышечную атрофию – и отвели два года жизни, однако в 32 года он был избран в Королевское общество, а в 35 лет стал лукасовским профессором, возглавив кафедру математики в Кембридже, – когда-то эту должность занимал Исаак Ньютон. Хокинг едва не умер от пневмонии в 1980-е гг., в результате лишился способности говорить и приобрел механический голос, ставший культовым. Книга «Краткая история времени»[33] сделала его знаменитым и была продана в количестве более 10 млн экземпляров[34]. К моменту смерти в марте 2018 г. он пережил отпущенный ему когда-то срок более чем на полвека (илл. 7).

Близкие к Хокингу люди описывали его как сложного в общении человека[35], но во всяком случае это был самый оригинальный и выдающийся физик со времен Эйнштейна[36]. В своей диссертации на соискание степени доктора философии Хокинг сосредоточился на теме, которую большинство физиков предпочитали избегать, – сингулярностях. Как мы видели, подразумевающаяся в центре черной дыры сингулярность заставила даже Эйнштейна усомниться в собственной теории. В математике сингулярность – ситуация, когда функция имеет бесконечное значение. И это обычное явление: математикам

известно множество способов работы с бесконечными величинами. Однако в физике бесконечность – серьезная проблема. Например, теория, описывающая жидкости, предсказывает, что в некоторых условиях плотность жидкости становится бесконечной. Ситуация явно выходит за пределы физики, что указывает на недостатки в теории. Хокингу, впрочем, не казалось, что сингулярности свидетельствуют о проблеме с общей теорией относительности. Он начал сотрудничество с математиком из Оксфорда Роджером Пенроузом, занимавшимся радикальным обновлением инструментов для изучения свойств пространственно-временного континуума.

Илл. 7. Стивен Хокинг на миг становится повелителем невесомости во время полета на модифицированном «Боинге-727» в 2007 г. Питер Диамандис, предприниматель в космической индустрии, организовал полет совместно с NASA. Хокинг надеялся совершить более продолжительный полет в условиях нулевой гравитации с компанией Virgin Galactic. *Джим Кэмпбелл / Aero-News Network*

В общей теории относительности пространственно-временной континуум ведет себя странно, но это часть теории, а не признак роковой ошибки. Пространственно-временной континуум имеет складки, разрывы, края, дыры, перегибы, является многосвязным и топологически сложным[37]. «Ландшафт» общей теории относительности существенно отличается от «ландшафта» ньютоновской гравитации, в основе которого лежит трехмерное пространство, повсеместно простое и линейное. Общая теория

относительности включает возможность сингулярностей.

В этой теории имеется лишь два типа сингулярности пространственно-временного континуума. Сингулярность может быть вызвана сжатием материи до достижения бесконечной плотности (как в черной дыре) или возникнуть, когда свет приходит из области пространства с бесконечной искривленностью и плотностью энергии (как при Большом взрыве). Первую можно сравнить с плоским продырявленным листом бумаги или с краем листа, вторая не имеет точной аналогии. Любая частица, движущаяся вдоль листа бумаги, просто исчезает, натолкнувшись на сингулярность. Хокинг и Пенроуз решили провести общее исследование. Они отказались от многочисленных допущений и доказали знаменитую серию теорем о сингулярности, продемонстрировав, что в общей теории относительности сингулярности неизбежны. Иными словами, это ее свойство, а не баг. Любая черная дыра должна иметь сингулярность массы, и любая расширяющаяся вселенная (такая, как наша) в обязательном порядке начинается с сингулярности энергии. В своей диссертации Хокинг использовал пример из космологии, что моментально подняло его на звездные высоты в тонких мирах теоретической физики[38].

Затем Хокинг перенес свое внимание на черные дыры. Вместе с двумя коллегами он предположил, что, как и все остальные объекты во Вселенной, черные дыры подчиняются законам термодинамики. К этому моменту – к середине 1960-х гг. – было найдено полное решение в рамках общей теории относительности для вращающейся черной дыры вдобавок к предшествующему решению Шварцшильда для неподвижной черной дыры. В математике или физике решение – это набор значений переменных, удовлетворяющих условиям всех уравнений. Точные решения в общей теории относительности найти весьма сложно – за 100 лет их было найдено всего два!

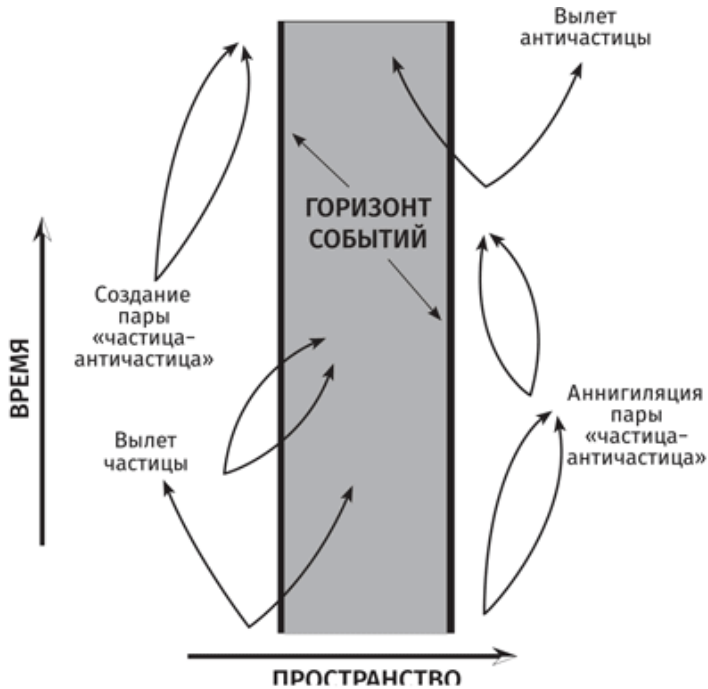
Один из «законов» Хокинга для черных дыр гласил, что площадь их поверхности всегда увеличивается. Когда материя падает в черную дыру, площадь горизонта событий растет, а при слиянии двух черных дыр площадь возникающего горизонта событий оказывается больше суммы площадей горизонтов событий их обеих. Это вызвало новые споры, закончившиеся поразительным выводом.

В 1967 г. Джон Уилер предположил, что черные дыры – очень простые объекты, для описания которых достаточно массы и момента импульса[39]. Мастер броских наименований, он назвал идею «теоремой об отсутствии волос», подразумевая, что большинство физических тел имеют «волосы» – детали, которые

их характеризуют. Яаков Бекенштейн, один из магистрантов Уилера, попробовал соединить теорию Уилера с хокинговским пониманием площади поверхности черной дыры. Бекенштейн заявил, что площадь поверхности черной дыры является мерой ее энтропии. В расхожем употреблении энтропия означает непорядок. В физике энтропия – показатель количества возможных способов реорганизации атомов или молекул физического тела без изменения его общих свойств.

Из теоремы «об отсутствии волос» следует, что у черных дыр нет энтропии, но, как указал Бекенштейн, ничто наблюдаемое в природе не свободно от действия второго закона термодинамики – энтропия всегда возрастает – и черные дыры не могут быть исключением[40]. Поскольку термодинамика – краеугольный камень физики, Хокинг принял аргумент Бекенштейна, но столкнулся с новой задачей. Если у черной дыры есть энтропия, то должна быть и температура. Если у нее есть температура, она должна излучать энергию. Но, если ничто не способно вырваться из черной дыры, как она может излучать энергию?

Предложенное Хокингом решение этого противоречия ошеломило мир теоретической физики. Он заявил, что черные дыры испаряются. Вот как это происходит. В классической физике космический вакуум пуст, но, согласно квантовой теории, в нем постоянно возникают и уничтожаются «виртуальные частицы». Они существуют ничтожно малые промежутки времени, разрешенные принципом неопределенности Гейзенберга. В нормальных условиях эти пары частиц и античастиц или пары фотонов исчезают, ни на что не влияя, однако вблизи горизонта событий черной дыры мощная гравитация может разъединить виртуальные пары. Одна часть падает в дыру, а другая улетает прочь и становится реальной – так черная дыра излучает энергию (илл. 8). Источником энергии, необходимой для создания реальной частицы, является гравитационное поле черной дыры, вследствие чего ее масса уменьшается. Шутливо опровергая знаменитую остроту Эйнштейна о квантовой механике «Бог не играет с Вселенной в кости», Хокинг заявил: «Бог не только играет в кости, но иногда бросает их туда, где их невозможно увидеть»[41].



Илл. 8. Черные дыры — не совсем черные. Виртуальные пары частиц-античастиц постоянно появляются и по прошествии краткого периода времени аннигилируют. Согласно теории Стивена Хокинга, когда процесс протекает возле горизонта событий черной дыры, один член пары может вырваться, а второй будет втянут черной дырой. В результаты черные дыры излучают энергию и медленно испаряются. *Крис Импи*

Излучение Хокинга – спорная, но, безусловно, блестящая идея. Вскоре Хокинг был избран в члены Королевского общества. К сожалению, для остатка звезды солнечной массы эффекты излучения Хокинга крайне слабы – одной десятимиллионной кельвина слишком мало для астрономических измерений. Скорость испарения невероятно низка. Потребуется 10^{66} лет, чтобы черная дыра с такой же массой, как у Солнца, совершенно исчезла. Зато кульминация этого процесса впечатляет: с уменьшением массы увеличиваются температура и скорость испарения, и черные дыры исчезают на пике стремительно растущего излучения.

По мере изучения черные дыры представлялись все более странными объектами. Физики исследовали их свойства, подвергая сомнениям даже сам факт их существования. В 1935 г. Альберт Эйнштейн и Натан Розен предположили, что между двумя точками пространственно-временного континуума могут существовать «мосты»[42]. Черная дыра может находиться на

любом конце такого моста, который Джон Уилер окрестил «кротовой норой»[43]. Общая теория относительности также допускает существование областей пространства-времени, в которые невозможно проникнуть извне, но откуда, однако, могут выходить свет и материя. Это так называемые белые дыры. Область черной дыры будущего может иметь область белой дыры в качестве своего прошлого. Ученые не наблюдали за кротовыми норами и белыми дырами, но, по замечанию Стивена Вайнберга «в физике так часто бывает – нашей ошибкой является не чрезмерно серьезное, а недостаточно серьезное отношение к собственным теориям»[44].

В массовой культуре черные дыры стали символом смерти и разрушения. Однако в них заключена и надежда на трансформацию и вечную жизнь, поскольку на горизонте событий время застывает и никто не знает, что находится внутри. Романист Мартин Эмис писал: «Хокинг понимал черные дыры, потому что мог *вглядываться* в них. Черные дыры означают забвение. Смерть. Хокинг вглядывался в смерть всю свою взрослую жизнь»[45].

Пари о черных дырах

Со Стивеном Хокингом было выгодно держать пари – чаще всего он проигрывал[46]. Его первый спор касался гипотезы космической цензуры. В 1969 г. Роджер Пенроуз предположил, что сингулярности всегда «спрятаны» за горизонтом событий. За исключением Большого взрыва, голых сингулярностей не существует. Горизонт событий не даст наблюдателю увидеть материю, сдавленную до бесконечной плотности. Сингулярность оборачивается серьезными концептуальными проблемами для общей теории относительности, и потому физики надеялись, что черные дыры всегда имеют горизонт событий. В 1991 г. Хокинг поспорил на $100 с двумя физиками-теоретиками из Калтеха – Джоном Прескиллом и Кипом Торном, утверждая, что гипотеза космической цензуры верна и голых сингулярностей не существует. В 1997 г. моделирование на суперкомпьютере показало, что при определенных условиях коллапс черной дыры может привести к голой сингулярности, которая создана природой или, возможно, высокоразвитой цивилизацией. Хокинг признал свое поражение, выплатил проигрыш и подарил двум своим коллегам футболки с надписью: «Природа не выносит сингулярности».

В том же году Хокинг побился об заклад с Прескиллом, заявив, что информация в черной дыре уничтожается (на сей раз

Торн занял его сторону). «Информация» в этом контексте связана с энтропией. Высокая энтропия означает беспорядок и малый объем информации. Например, нормальный газ сильно разупорядочен, и для его описания достаточно считаных единиц информации: плотность, температура и химический состав. Черные дыры обладают громадной энтропией, существенно превышающей формирующие их газовые шары, и, соответственно, описываются даже меньшим числом единиц, чем газ: нам известны только их масса и осевое вращение[47]. В принципе, черную дыру можно создать бесконечно разными способами – например, сжатием газа и каменной породы или даже книг и непарных носков, – но невозможно увидеть информацию извне. Затем черная дыра испаряется, выделяя неупорядоченное излучение. Что происходит с информацией – в первую очередь о том, из чего сделана черная дыра? Этот вопрос получил название информационного парадокса.

В 2004 г. Хокинг проиграл и это пари. На конференции в Дублине он пересмотрел свою позицию и сказал, что информация может пережить падение в черную дыру, хотя и в искаженном виде, – как если бы сгорела энциклопедия и мы бы нашли ничтожные остатки содержавшейся в ней информации среди дыма и пепла. Возможно, новейшие технологии позволят восстановить типографскую краску и текст. Хокинг оставил положения квантовой механики, но отказался от предшествующего рассуждения, согласно которому информация может не только сохраняться внутри черной дыры, но и переходить в другие вселенные, ответвляющиеся от черной дыры. Он сказал *The New York Times*: «Жаль разочаровывать поклонников научной фантастики, но даже если информация сохраняется, невозможно использовать черные дыры для путешествий в другие вселенные»[48]. Хокинг ссылался на предложенную в космологии идею о том, что состояние, предшествовавшее Большому взрыву, могло породить множественные вселенные. Ученый добавил, что черные дыры могут служить путями перемещения информации между вселенными. Выполняя условия пари, Хокинг вручил своему другу Прескиллу энциклопедию бейсбола, из которой «информацию можно восстановить без всякого труда», а первоначальное заявление о потере информации объявил своим «величайшим промахом»[49].

Я встречал Стивена Хокинга в конце 1970-х гг., когда учился в магистратуре. В Лондоне он читал лекцию о черных дырах в честь своего назначения лукасовским профессором математики. Хокингу было 36 лет, он состоялся как блестящий физик. Он уже десять лет сидел в инвалидном кресле, его речь настолько

ухудшилась, что его понимали лишь немногочисленные члены семьи и близкие коллеги. Один из студентов, стоя вплотную к Хокингу, разбирал его слова и передавал аудитории. Помню, что к концу лекции проникся глубочайшим убеждением, что, какие бы препятствия ни встретились мне в жизни и в карьере, все это будет ничто по сравнению с тем, что испытывал Хокинг.

Двадцать лет спустя мы с двоюродным братом посетили публичную лекцию Хокинга в Кембридже. Текст лекции был подготовлен заранее и озвучивался синтезатором речи – это стало визитной карточкой Хокинга. Он отвечал на вопросы медленно, так как ему приходилось одним пальцем выбирать нужные фразы из огромной компьютерной базы. Но колкий юмор ученого проявился сполна. Кто-то спросил: «Мы когда-нибудь сможем использовать черные дыры, чтобы спасти человечество от уничтожения?» Помедлив, Хокинг напечатал: «Надеюсь, нет». Другой вопрос: «Может ли кто-нибудь выжить, падая в черную дыру?» Он медленно набрал ответ: «Вы – может быть. У меня и без того достаточно проблем».

В действительности ответ на второй вопрос заключается в том, что, к сожалению, падающий в черную дыру путешественник не выживет, его ждет «спагеттификация» под действием силы растяжения вследствие гравитации. Гравитация слабеет обратно пропорционально квадрату расстояния до объекта. Для любого компактного объекта – такого как черная дыра – разница между гравитацией, действующей на две точки на разных расстояниях от этого объекта, может быть большой – это так называемая приливная сила[50]. На расстоянии 3000 км сила растяжения создаст между вашими головой и стопами ускорение, примерно равное гравитации Земли. Приятного мало, но вы выживете. На расстоянии 1000 км сила растяжения в 50 раз превысит земную гравитацию и разорвет на части ваши кости и внутренние органы. В 300 км – все еще далеко от горизонта событий – сила растяжения в 1000 раз превысит гравитацию Земли, твердые тела разрушатся. Спагеттификация – не детская игра, в которой один тянет вас за ноги, а другой – за руки, и даже не средневековая пытка дыбой. Пространственно-временной континуум возле черной дыры искривляется, и вас растягивает на всех уровнях: мышечных волокон, клеток и спирали ДНК.

Возникает парадокс. Горизонт событий – это точка невозврата, информационная мембрана: информация проникает внутрь, но не наружу. Если бы вы могли нырнуть в черную дыру с цифровыми часами и каким-то образом избежать спагеттификации, вам показалось бы, что часы продолжают нормально идти, пока вы в свободном падении погружаетесь в

горизонт событий. Тем временем ваш компаньон, наблюдающий за падением, увидит, что часы замедляются, а ваша деформированная фигура медленно приближается к горизонту событий – до тех пор, пока вы не остановитесь вместе с часами. Теперь представьте, как мы бросаем в черную дыру книгу. Согласно законам гравитации, книга пересечет горизонт событий и информация будет утрачена, но с точки зрения стороннего наблюдателя книга никогда не достигнет горизонта событий. Утрачивается ли информация или каким-то образом «сохраняется» на горизонте событий?

Впрочем, Хокинг был рад проиграть одно пари – первое пари с Кипом Торном, заключенное в 1975 г. Хокинг оспорил существование черной дыры – это должно было его подстраховать. Он надеялся на проигрыш, но если бы выиграл, то, по его словам, утешился бы четырехлетней подпиской на британский сатирический журнал *Private Eye*. Как мы узнаем из следующей главы, источник высокоэнергетического излучения Лебедь X-1 оказался убедительным кандидатом в черные дыры, и в 1990 г. Хокинг признал свое поражение. В качестве выигрыша Торн получил годовую подписку на *Penthouse*[51].

Золотой век теории черных дыр

После эпохальных открытий Хокинга изучение черных дыр пошло быстрее. Мы наблюдаем золотой век теории черных дыр, и с каждым годом выходит все больше статей. Физики пытаются согласовать «стройные» описания тел в общей теории относительности с «шероховатыми» описаниями материи в квантовой теории.

Как сказано выше, вопрос о том, что происходит с информацией на горизонте событий, остается величайшей загадкой. Теория испарения черных дыр Хокинга проникает в арсенал квантовой механики. Изначально ученый утверждал, что излучение черной дыры хаотично и случайно и при испарении черной дыры теряется вся содержавшаяся в ней информация. Это противоречит основной предпосылке квантовой теории, согласно которой взаимодействия частиц обратимы во времени, следовательно, можно было бы «проиграть фильм задом наперед» и восстановить начальное состояние из конечного. Противоречия между двумя весьма успешными теориями в физике – общей теории относительности и квантовой механики – многие ученые восприняли как кризис.

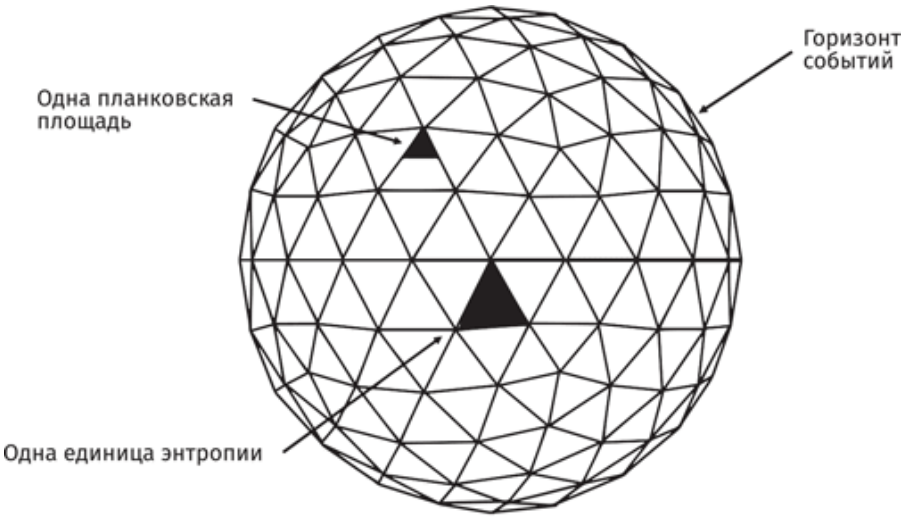
В 1996 г. Энди Строминджер и Кумрун Вафа воспроизвели энтропию и излучение Хокинга с помощью теории струн[52].

Теория струн – это растянувшаяся на много десятилетий попытка объединить четыре фундаментальные силы природы с концепцией материи не как частиц, а крохотных одномерных «струн» энергии, существующих в пространственно-временном континууме, имеющем, возможно, восемь или десять измерений. Теория струн более фундаментальна, чем стандартная квантовая теория, поскольку постулирует единственную сущность, лежащую в основе всевозможных частиц, таких как электроны, протоны и нейтроны. Она красива и математически точна, но ее трудно проверить. Однако потрясающим образом с ее помощью удалось объяснить некоторые важные свойства черных дыр – впервые микроскопическая теория материи была успешно применена в области сильной гравитации. Исследование Строминджера и Вафы позволило предположить, что информация, попавшая в черную дыру, действительно может быть восстановлена. Однако ученые по-прежнему не пришли к согласию по вопросам сохранения информация и по поводу того, что теория струн может сказать о природе черных дыр.

Многие ведущие физики трудятся над этой головоломкой[53]. Согласно одной оригинальной идее, информация хранится на горизонте событий подобно тому, как голограмма служит двумерным информационным хранилищем трехмерного объекта. Если информация о содержимом черной дыры каким-то образом кодируется на поверхности (илл. 9), то это разрешает информационный парадокс. В 2012 г. в этой бочке меда обнаружили большую ложку дегтя: виртуальные частицы, обеспечивающие излучение Хокинга, оказались связанными – их квантовые состояния одинаковы даже на большом удалении друг от друга. Извлечь информацию, нарушив эту связность, означает высвободить мощный поток излучения, создав «стену огня» (файрвол) прямо над горизонтом событий. Путешественника ждет не скучное погружение в черную бездну, а уничтожение стеной огня. Однако для внешнего наблюдателя путешественник так и останется на горизонте событий, как муха на липкой ленте. Умрет или выживет? Никто не может выбраться наружу, и ничто не может проникнуть внутрь. Неизбежна ли стена огня? Ученые продолжают об этом спорить.

Этот спор показывает, как сильно менялись представления в процессе разработки теории черных дыр. Предоставим заключительное слово Энди Строминджеру. В статье 2016 г. «Мягкие волосы черных дыр», написанной в соавторстве с Хокингом, он оспаривает теорему Джона Уилера об отсутствии волос и идентифицирует частицы, которые могут играть роль квантовых пикселей информационного хранилища на границе

черной дыры. Эта работа еще не завершена. Строминджер признает: «У меня есть список из 35 задач, решение каждой отнимет несколько месяцев. Физикам-теоретикам такое по вкусу: есть вещи, которые мы не понимаем, но можно сделать расчеты, что неизбежно приведет к пониманию»[54].



Илл. 9. Энтропия черной дыры пропорциональна площади горизонта событий. Энтропию также можно рассматривать как информацию. Минимальная единица, или бит, информации соответствует планковской площади и определяется скоростью света, силой гравитации и постоянной Планка. Это аналогично тому, как если бы содержимое черной дыры было бы записано на горизонте событий в виде битов информации. *Крис Импи*

За последние 100 лет черные дыры из монструозных идей, противоречащих здравому смыслу, превратились в испытательный полигон для проверки блестящих физических теорий. Черные дыры – подарок Вселенной. Их содержимое скрыто и загадочно, однако даже обертку этого ящика интересно изучать. Я вспоминаю ироничное замечание Марка Твена: «Все-таки в науке есть что-то захватывающее. Вложишь какое-то пустяковое количество фактов, а берешь колоссальный дивиденд в виде умозаключений»[55].

Пора задать прагматичный вопрос: а черные дыры действительно существуют?

2. Черные дыры, рожденные смертью звезд

Наука опирается на взаимодействие теории и наблюдения. За тысячелетия люди предлагали множество оригинальных объяснений устройства Вселенной, но без данных, полученных путем наблюдения, даже самая умная мысль останется умозрительной. Есть ли свидетельства того, что во Вселенной масса способна исчезнуть из вида?

Трудно представить черные дыры, но они реальны. После почти 50 лет исследования конечных стадий жизни звезд это точно известно. Изолированная черная дыра совершенно невидима. Создаваемый ею разрыв пространственно-временного континуума настолько мал, что не выявляется никаким телескопом. Однако в большинстве своем звезды – это двойные или кратные системы, и видимая звезда может дать информацию о своей темной спутнице.

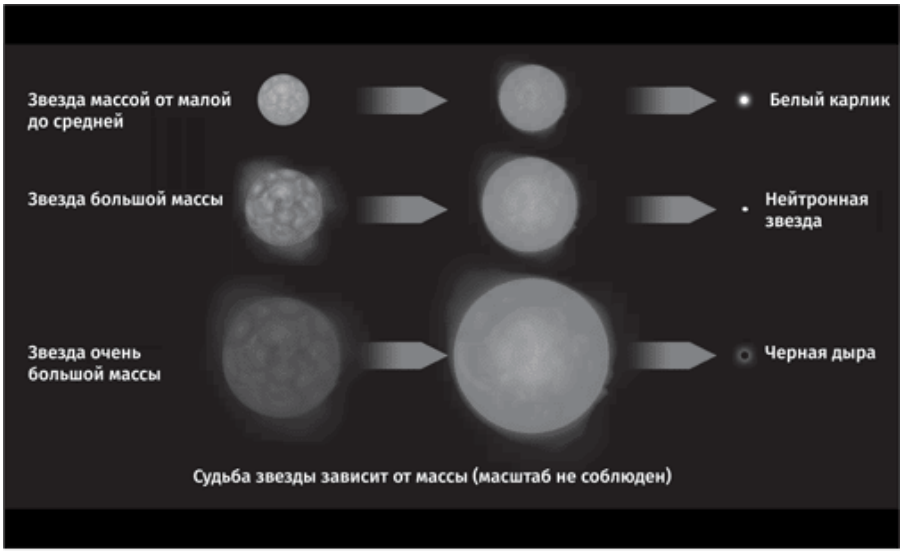
Силы света и тьмы

Трудно поверить, глядя на Солнце, что перед вами разворачивается титаническая битва сил света и тьмы. День за днем и год за годом Солнце кажется практически неизменным, но оно испускает частицы, мчащиеся с огромной скоростью, и постоянно выбрасывает облака плазмы размером с планету; по сути это ядерная печка с термостатическим управлением. В каждой точке Солнца сохраняется равновесие между направленной внутрь гравитацией и направленным вовне теплом, генерируемым в результате слияния ядер водорода в ядра гелия[56]. Пока есть топливо для реакции синтеза, силы будут равны.

Если хотите поставить на долгосрочный исход этой битвы, ставьте на гравитацию. Запасы ядерного топлива ограниченны, а гравитация вечна. Когда в таких звездах, как Солнце, кончается водород, внутреннее давление исчезает и ядро звезды начинает коллапсировать до более горячего и плотного состояния, при котором из гелия может синтезироваться углерод. Реакция происходит быстро, и, когда гелия не остается, температура более не поднимается, а без этого не происходит запуска новых реакций слияния ядер. Без давления, поддерживающего стабильность, ядро звезды снова испытывает гравитационный коллапс. Израсходовав последнее топливо, Солнце переживет короткую фазу сияния, сбросив около трети своей массы в виде газовой оболочки, разлетающейся со сверхзвуковой скоростью. Быстро

движущийся газ будет нагреваться и светиться, формируя красивейшую яркую планетарную туманность. Наблюдатель, смотрящий на Солнце из другой звездной системы с расстояния 5 млрд световых лет, увидит потрясающее световое шоу. Однако наблюдателям с Земли не поздоровится: выброс газа испарит биосферу и уничтожит все живое на планете[57].

Жизнь и смерть звезды зависят от ее массы (илл. 10). Судьбы звезд предопределены с рождения. В зависимости от массы звезды становятся белыми карликами, нейтронными звездами или черными дырами. Не существует «типичной» массы или величины, хотя процесс формирования звезд из неупорядоченных облаков газа порождает гораздо больше мелких звезд, чем крупных. Солнце тяготеет к нижнему краю диапазона масс, под ним располагаются тусклые красные карлики. Красных карликов в несколько сот раз больше, чем солнцеподобных звезд. Продолжительность жизни звезды также зависит от массы, поскольку гравитация определяет температуру ядра, от которой, в свою очередь, зависит скорость протекания термоядерных реакций и, соответственно, временной резерв топлива. Звезда, подобная Солнцу, синтезирует гелий из водорода в течение 10 млрд лет; мы находимся в середине этого периода[58]. Продолжительность жизни звезды в половину солнечной массы – 55 млрд лет, поэтому в истории Вселенной, которой всего 14 млрд лет, еще не умирала ни одна такая звезда. Красный карлик в одну десятую массы Солнца – минимальная масса для звезды, способной осуществлять реакции термоядерного синтеза, – расходует топливо ничтожными порциями. Такая звезда теоретически проживет свыше триллиона лет – и это невообразимо долго. Тем не менее карликовая звезда лишь оттягивает неизбежное, поскольку однажды и она израсходует топливо, тусклый свет погаснет, и гравитация получит свое.



Илл. 10. Судьба звезды зависит от массы. Большинство звезд, включая Солнце, имеют массы от малых до средних и, израсходовав ядерное топливо, умрут, превратившись в остывающие угольки — белые карлики. Более массивные звезды имеют больше топлива, но живут меньше, и их смерть — это нейтронная звезда или черная дыра. *NASA / Chandra Science Center*

Звезды массивнее Солнца живут меньше и ярче. Они ведут себя так же, как Солнце в данный момент, – синтезируют ядра водорода в ядра гелия, но их гравитация сильнее, соответственно, температура ядра выше, и топливо расходуется с бешеной скоростью. Чем массивнее звезда, тем горячее ее ядро и короче жизнь. Массивные звезды могут пустить на реакцию синтеза все элементы периодической таблицы, вплоть до железа – самого прочного элемента. На железе реакции синтеза прекращаются, и ядро звезды переходит в причудливое физическое состояние: в плазму из атомов железа в 100 раз плотнее воды и при температуре миллиард градусов. В отсутствие давления изнутри ядро коллапсирует, и направленная внутрь волна сжатия порождает противоположно направленную волну – выброс с температурой несколько миллиардов градусов, в котором за доли секунды синтезируются тяжелые элементы, вплоть до урана. Появление сверхновой звезды – одно из самых ярких событий во Вселенной. Драгоценные металлы, выброшенные в космос, сформируют новое поколение звезд и планет. Значительная часть исходной массы звезды извергается в пространство, но остатки сжимаются безжалостными тисками гравитации.

Гравитация и тьма окончательно побеждают

Остатки звезды – крайне странное состояние материи. Мы не можем воссоздать его в лаборатории. Остается лишь теоретизировать, опираясь на законы физики, и надеяться, что наши теории достаточно основательны. Лучшие умы среди астрофизиков XX в. пытались разобраться в природе остатков звезд.

Итог эволюции звезды зависит от ее массы на момент начала жизни. Звезды рождаются в результате фрагментации и коллапса больших облаков газа, и малых звезд будет много больше, чем массивных. Все звезды, взрослея, теряют некоторую долю массы. Это сложные процессы, поэтому нельзя четко разграничить значения масс, определяющих судьбу звезды. Молодые звезды с массой меньше 8 солнечных коллапсируют в необычайно плотное состояние материи – это так называемые белые карлики. Большинство звезд менее массивны, чем Солнце, поэтому свыше 95 % звезд ждет именно такой финал. Например, на последней, ярчайшей стадии своей жизни Солнце сбросит около половины своей массы – и умрет белым карликом.

В 1783 г. английский астроном Уильям Гершель случайно открыл звезду, получившую название 40 Эридана B, но он не мог измерить ее размер и потому не понял, что она необычна. В 1910 г. астрономы снова сосредоточили свое внимание на этой тусклой звезде, входящей в двойную систему. Судя по орбите, ее масса должна быть примерно такой же, как у Солнца. Ученые знали расстояние до звезды и высчитали, что она в 10 000 раз тусклее, чем было бы Солнце на такой же дистанции. Однако она была белой – следовательно, горячее Солнца. Чтобы понять, почему это странно, представьте, что смотрите на нагревательные элементы электроплитки в темном помещении. Одна конфорка включена на слабый нагрев и светится оранжевым, как Солнце. Другая, включенная на максимум и значительно более горячая, светится белым. Белая конфорка намного ярче оранжевой. Чтобы белая конфорка казалась гораздо тусклее оранжевой, она должна быть намного меньше. По той же логике тусклая звезда в системе 40 Эридана должна быть значительно меньше Солнца. При той же массе, что и у Солнца, она должна иметь еще и значительно большую плотность[59].

Эрнст Эпик вычислил, что плотность 40 Эридана B в 25 000 раз больше солнечной, и назвал ее «невозможной»[60]. Артур Эддингтон, популяризатор термина «белый карлик», описал поразительную реакцию на обнаружение подобного объекта: «Мы узнаем о звездах, получая и интерпретируя сообщения, которые

несет нам их свет. Сообщение… когда оно было расшифровано, гласило: “Я состою из вещества, которое в 3000 раз плотнее всех известных вам веществ; тонна моего вещества была бы кусочком, помещающимся в спичечный коробок”. Что можно ответить на подобное сообщение? “Замолчи. Хватит нести чушь”, – вот что ответило большинство из нас в 1914 г.»[61].

Эддингтон не страдал излишней скромностью. Услышав от коллеги: «Профессор Эддингтон, вы, должно быть, один всего лишь из трех человек в мире, понимающих теорию относительности», – он промолчал. «Не скромничайте», – стал убеждать коллега, и Эддингтон ответил: «Напротив, я пытаюсь понять, кто мог бы быть третьим»[62]. Хотя Эддингтон был блестящим астрофизиком и предсказал обнаружение белых карликов, он назвал их «невозможными звездами».

Типичный белый карлик имеет размер Земли, но массу Солнца. Его плотность в миллион раз выше плотности воды. Ввиду отсутствия термоядерных реакций нет энергии, соответственно, нет давления изнутри наружу, и гравитация сдавливает газ, разрушая структуру атома и образуя плазму из несвязанных ядер и электронов. Лишь тогда гравитация наконец встречает противодействие. В 1925 г. Вольфганг Паули постулировал принцип запрета, гласящий, что никакие два электрона не могут иметь совершенно одинаковый набор квантовых свойств. Следствием принципа Паули является возникновение давления, препятствующего дальнейшему коллапсу остатков звезды[63]. Белый карлик образуется при температуре до 100 000 кельвинов и постоянно излучает тепло в окружающее пространство, пока не израсходует его. А затем гаснет и погружается во тьму.

Субраманьян Чандрасекар, в то время 19-летний студент Кембриджа, получавший стипендию правительства Индии, вычислил, что независимо от исходной массы звезды оставшийся от нее белый карлик не может быть массивнее примерно 1,4 массы Солнца. При большей массе гравитация берет верх над квантовой механикой и звезда коллапсирует в сингулярность. Максимальная масса белого карлика называется пределом Чандрасекара[64]. Это были блестящие расчеты, и можно понять разочарование Чандрасекара, когда его кумир Артур Эддингтон публично высмеял идею коллапса в сингулярность. Чандрасекар был унижен – он счел, что выпад отчасти носит расистский характер. Мы привыкли считать науку областью меритократии, но ученые тоже бывают завистливыми и недальновидными. (Пионер квантовой механики Поль Дирак, столкнувшийся с похожим давлением, метко заметил, что наука развивается в ритме «одни

похороны за раз».) Но Чандрасекар оказался прав и удостоился Нобелевской премии по физике за открытия в области строения и эволюции звезд.

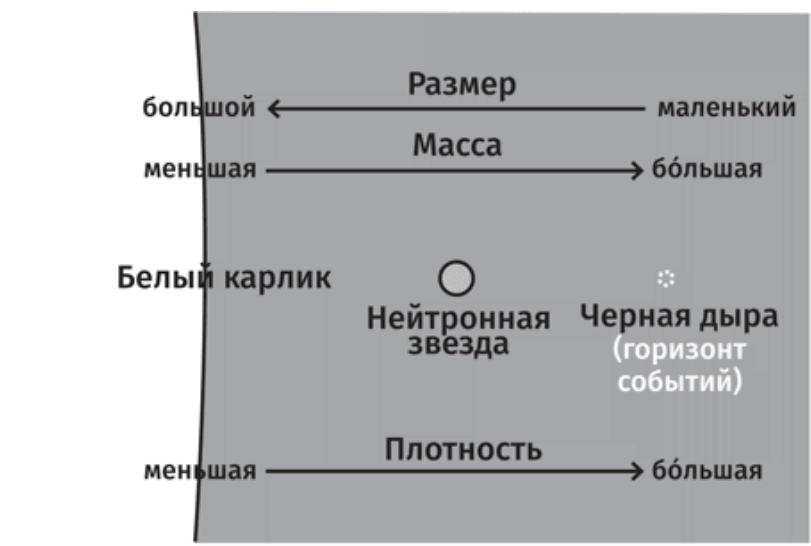
Чандрасекар указал физикам путь к пониманию того, что происходит со звездой, коллапсирующей за пределы состояния белого карлика. Через несколько лет калифорнийские астрономы Вальтер Бааде и Фриц Цвикки почти случайно предположили, что за пределом Чандрасекара звезда может коллапсировать в чистое нейтронное вещество, но не сделали никаких вычислений в поддержку своей идеи. В 1939 г. Роберт Оппенгеймер, тяжелый в общении человек и заядлый курильщик, выполнил математические расчеты и вместе со своим магистрантом определил диапазон масс нейтронных звезд[65]. В том же году, как мы уже знаем, он доказал, что, если остатки звезды выходят за верхнюю границу этого диапазона, составляя больше 3 масс Солнца, должна образоваться черная дыра.

Перед смертью все звезды теряют массу. Как вы помните, прежде чем стать белым карликом, Солнце лишится половины своей массы. Все звезды, начинающие жизнь с массой до 8 солнечных, станут белыми карликами – до 1,4 солнечной массы. Если начальная масса звезды составляет примерно от 8 до 25 солнечных, то коллапс ее ядра продолжается до тех пор, пока все протоны и электроны не сольются в чистое нейтронное вещество[66]. В отсутствие электрической силы нейтроны располагаются плотно, как яйца в картонке. Дальнейшему коллапсу вещества противостоят ядерные и квантовые силы, что не дает белому карлику сжиматься еще больше. Это нейтронная звезда, самая маленькая и плотная звезда во Вселенной. Ее масса превышает 25 солнечных масс. Поприветствуйте потенциальное чудовище Эйнштейна (илл. 11).

Нейтронную звезду очень трудно представить[67]. Это некое атомное ядро величиной с большой город, его атомное число – 10^{57}. Его вещество в тысячу триллионов раз плотнее воды. Вещество белого карлика размером с кубик сахара-рафинада, доставленное на Землю, будет весить тонну, но такой же кубик вещества нейтронной звезды весил бы на Земле как гора Эверест. Когда звезда так сильно коллапсирует, магнитное поле также сдавливается и уплотняется. У некоторых нейтронных звезд магнитное поле может превышать земное в тысячу триллионов раз[68]. Гравитация у поверхности настолько сильна, что тело, падающее с высоты 1 м, в момент удара с поверхностью достигнет ускорения 1,3 млн м/с. В силу закона сохранения момента импульса нормальное спокойное вращение солнцеподобной звезды вокруг своей оси значительно ускоряется при коллапсе.

Самые быстрые нейтронные звезды совершают 716 оборотов в секунду – или 42 000 в минуту. Вращающееся с такой скоростью твердое тело не вполне стабильно, и под его корой может произойти катастрофическое событие – звездотрясение.

Как обнаружить нейтронную звезду? Звезды размером с мегаполис излучают очень мало света, поскольку, в отличие от нормальных звезд, в них не происходят реакции термоядерного синтеза. Около 20 лет ученые считали их астрономической диковинкой – умозрительными объектами, которые никогда не удастся обнаружить. В 1967 г. молодая магистрантка Джоселин Белл и ее научный руководитель Тони Хьюиш зарегистрировали радиоимпульсы периодичностью 1,3373 секунды, поступающие от неизвестного объекта в созвездии Лисички. Импульсы были настолько мощными и регулярными, что Белл и Хьюиш приняли объект за радиомаяк и в шутку назвали его LGM-1 (от Little Green Men – «маленькие зеленые человечки»). Вскоре были открыты другие «пульсары», и Белл и Хьюиш связали их с более ранними предсказаниями существования нейтронных звезд. Мощное магнитное поле вызывает радиоизлучение горячих пятен на поверхности нейтронной звезды, и, если пучки излучения вращающейся нейтронной звезды попадают в зону обзора радиотелескопа, их можно наблюдать.



Илл. 11. Чем больше начальная масса звезды, тем меньше и плотнее ее остатки после полного завершения реакций синтеза. Кривая слева позволяет оценить размер белого карлика. Хотя нейтронные звезды и черные дыры всего в несколько раз массивнее белых карликов, они, как видите, намного меньше и плотнее. *Патрик Лен / Колледж Куэста*

Спустя семь лет разразилась полемика: Нобелевскую премию за открытие пульсаров присудили Хьюишу и Мартину Райлу, главе радиообсерватории, а не Джоселин Белл – реальному автору открытия. Ученое сообщество в большинстве своем полагало, что ее обошли, так как она была молодой женщиной. В области физики Нобелевской премии удостоились чуть больше 200 ученых, и среди них только две женщины: Мария Кюри (1903 г.) и Мария Гёпперт-Майер (1963 г.)[69].

С помощью радиотелескопов постепенно было обнаружено более 3000 пульсаров. Однако условия появления горячих пятен крайне редки, и немногие нейтронные звезды являются радиопульсарами. В основном миллионы нейтронных звезд в нашей Галактике безмолвно вращаются в дальнем космосе, темные и недоступные для наблюдения.

Поиски первого черного лебедя

Это случилось в 1964 г. The Beatles покоряют Америку, а дерзкий молодой боксер Кассиус Клей становится чемпионом мира в тяжелом весе. Наука также переживает бурное развитие. Термин «черная дыра» впервые появился в публикации в январе 1964 г., а в июне маленькая ракета для исследования верхних слоев атмосферы, запущенная из Нью-Мексико, обнаружила мощный источник рентгеновского излучения в созвездии Лебедя. «Черными лебедями» называют редкие неожиданные события, играющие огромную роль в развитии науки. (Термин также используются философами, обсуждающими проблему индукции: наличие стаи белых лебедей не является доказательством того, что черных лебедей не существует.) Семь лет изысканий ушло на то, чтобы поймать первого «черного лебедя» в физике черных дыр[70].

В 1960-х гг. рентгеновская астрономия была новой научной областью. Высокоэнергетическое излучение космических источников регистрируется только в космосе, первый источник был обнаружен всего двумя годами раньше. Восемь источников, выявленных в ходе наблюдений 1964 г., соответствовали по своим характеристикам остаткам сверхновых звезд, то есть горячему газу, образующемуся при катастрофической смерти массивной звезды[71]. Наблюдения, приведшие к открытию, показывали низкую пространственную разрешающую способность и позволили сузить область локализации источника рентгеновского излучения в Лебеде лишь до размеров самого созвездия. В 1970 г. орбитальная рентгеновская обсерватория Uhuru обнаружила, что

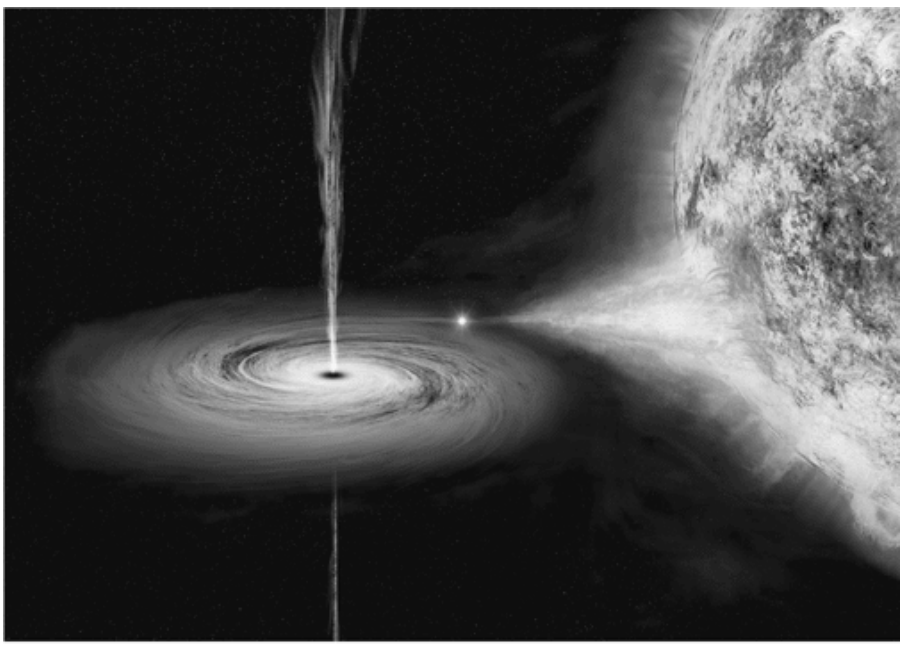
интенсивность Лебедя X-1 меняется менее чем за одну секунду. Для измерения размеров удаленных объектов астрофизики используют время, исходя из того, что изменение интенсивности излучения не может занимать меньше времени, чем нужно свету, чтобы пересечь источник света. Вариации интенсивности Лебедя X-1 говорили о том, что объект не может превышать 100 000 км в поперечнике – менее одной десятой размера Солнца.

Национальная радиоастрономическая обсерватория точно определила положение объекта в небе, что позволило соотнести источник переменного рентгеновского излучения с голубым сверхгигантом HDE226868. Сверхгиганты – это горячие звезды, однако они не способны на мощное рентгеновское излучение. Оставалось единственное объяснение: что-то в этой области пространства нагревало газ до температуры в миллионы градусов. Следующим смелым шагом стало использование оптических методов наблюдения. В 1971 г. две группы ученых изучили спектр голубого сверхгиганта и обнаружили периодические вариации доплеровского сдвига излучения звезды, соответствующие вариациям рентгеновского излучения[72]. Расчеты параметров орбиты позволили ученым оценить массу «невидимого» компаньона, втягивающего сверхгигантскую звезду. Ученые предположили, что черная дыра поглощает газ своей спутницы-звезды и что этот газ каким-то образом нагревается до такой степени, что его излучение обнаруживается в рентгеновском диапазоне (илл. 12).

Астроном Том Болтон сильно нервничал, готовясь представить эти результаты на конференции Американского астрономического общества в Пуэрто-Рико. Ему было всего 28 лет. «За пять минут до подачи статьи я еще переделывал ее на коленке. Сидя в дальнем углу, я пытался получить свежие данные для графика», – вспоминал он[73]. Чувствовалось и давление конкурентов. Всего год назад он стал доктором философии и работал один. Более опытная команда Гринвичской королевской обсерватории при помощи своего большого телескопа получала аналогичные данные по Лебедю X-1. Необходимо было проявить крайнюю осторожность в интерпретациях, поскольку в прошлом ошибочные утверждения об обнаружении черной дыры стоили некоторым научной карьеры. За год Болтон собрал доказательства и поставил на кон свою репутацию. Он представил работу в Институте перспективных исследований в Принстоне, где когда-то трудились Эйнштейн и Оппенгеймер. Наблюдения были проверенными. Аудиторию удалось убедить. Первый «черный лебедь» был найден!

К концу 1970-х гг. черные дыры проникли в массовую

культуру. Их странные свойства впечатлили тех, кто вообще не интересовался астрономией. Студия Disney выпустила фильм «Черная дыра», и впервые в истории компании фильму присвоили рейтинг PG[74] – слишком страшной оказалась тематика. Низкотехнологичный и местами слабый – для своего времени это был смелый проект, сделавший черные дыры прообразом смерти и преображения. Попсовая наивность The Beatles переродилась в агрессивный рок. Rush, Queen, Pink Floyd – все они отдавали дань астрофизике[75].



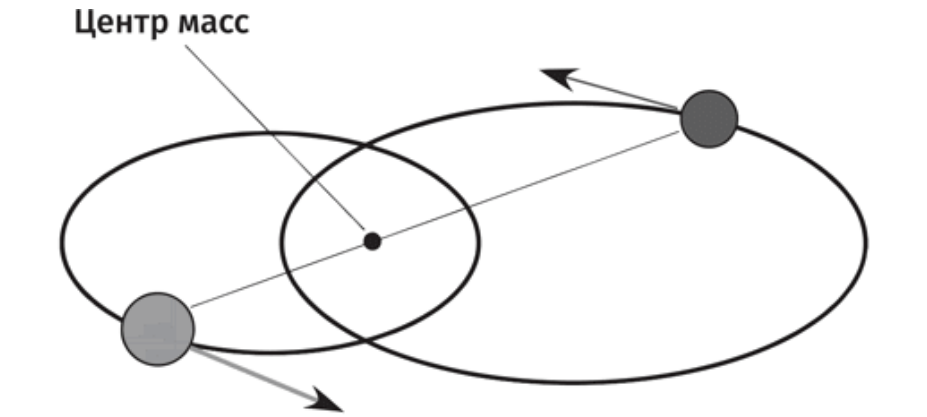
Илл. 12. Классическая черная дыра является сильнейшим источником рентгеновского излучения в созвездии Лебедя, Лебедь X-1. Черная дыра обращается по тесной орбите со вторым компонентом двойной системы, голубым сверхгигантом. Газ, притягиваемый черной дырой, образует аккреционный диск, сильно разогретый и потому испускающий мощное рентгеновское излучение. *NASA / художник Chabdra Science Center / М. Вайсс*

Как взвесить невидимого партнера по вальсу

Судьбу любой звезды определяет ее масса. Масса свидетельствует о запасах топлива для реакций термоядерного синтеза. Масса определяет и гравитацию звезды, следовательно, ее размер, внутреннюю температуру и давление, тип термоядерной реакции и ее скорость – все это задается одним

числом. Любое утверждение об обнаружении черной дыры должно опираться на надежную оценку массы. К сожалению, масса еще и самый сложный для измерения показатель. Данные визуального наблюдения позволяют оценить яркость и температуру поверхности, но, чтобы измерить расстояние до звезды и, следовательно, ее светимость, нужны отдельные наблюдения, после чего необходимо построить модель звезды, чтобы вывести массу.

Одиночная черная звезда, скрывающаяся в глубоком космосе, имеет громадную массу, но сама по себе она не может быть обнаружена. К счастью, больше половины звезд входят в двойные или кратные системы. Согласно закону тяготения Ньютона, два тела притягиваются друг к другу с равной силой. Они вращаются вокруг общей точки – центра масс, – относительно которой всегда занимают противолежащее положение. Представьте двоих, которые кружатся, взявшись за руки. Если они одного веса, то вращаются по орбите вокруг точки в центре между ними. Но если взрослый кружится с ребенком, то центр вращения смещен в сторону взрослого – можно сравнить это с метанием молота (на этом мы оставим аналогии). То же со звездами. Две звезды равной массы обращаются по орбитам на равном расстоянии от центра масс. Если массы не равны, более массивная звезда находится ближе к центру масс, а менее массивная имеет большее ускорение и быстрее движется по большей орбите (илл. 13)[76].



Илл. 13. В двойной звездной системе две звезды обращаются вокруг общего центра масс. Более массивная звезда находится ближе к центру масс, менее массивная — дальше от него. Если звезды слишком близки и неразличимы визуально, орбита измеряется методом спектроскопии: циклическое смещение спектральных линий к красному, а затем к синему концам диапазона длин волн дает орбитальный период. *Роберт Х. Гауди / Университет Содружества Вирджинии*

Таков общий принцип. Теперь добавим математику. При круговой орбите скорость равна окружности, деленной на время прохождения всей орбиты, или период. Измерив период и скорость обращения, можно получить радиус орбиты. Ньютоновский вариант третьего закона движения Кеплера связывает массу двух звезд на орбите с размером и периодом орбиты. Это четыре переменные, и нужно измерить три из них. Таким образом, в системе двойных звезд с одной видимой звездой и одним невидимым компаньоном мы должны измерить массу видимой звезды, чтобы вычислить массу темного тела[77]. Как это сделать?

В танцевальном зале темно. Женщина в белом. Мужчина в черном. При тусклом боковом освещении женщину можно разглядеть, но мужчина невидим. Они кружатся по залу. По тому, как движется женщина, мы понимаем, что ее обнимает невидимый партнер. Двойные звезды находятся в подобных тесных «объятиях» и так же «не замечают» окружающей Вселенной. Если пара звезд сильно разнесена и находится не слишком далеко от Земли, мы можем увидеть обе звезды и просто пронаблюдать за их движением, чтобы измерить орбиту. Это визуально-двойные звезды. Гораздо чаще звезды находятся далеко, и астрономы не видят их как отдельные тела, но спектроскопия показывает, что линии поглощения каждой звезды

попеременно сдвигаются в сторону более длинных и более коротких длин волн, демонстрируя периодическое доплеровское смещение, вызванное орбитальным движением. Это спектрально-двойные звезды. Если один из компонентов двойной системы является черной дырой, приходится работать с неполной информацией, поскольку на спектрограмме видны только линии поглощения видимой звезды.

Как и в случае с танцующей парой, движение видимой звезды указывает на движение невидимой спутницы. Есть, однако, две серьезные проблемы. Во-первых, нам нужно узнать массу видимой звезды. То есть определить расстояние до двойной системы, чтобы вычислить светимость, или количество фотонов, излучаемых звездой каждую секунду. Затем эти показатели, а также температура поверхности звезды (определяемая по ее цвету) и ускорение силы тяжести на ее поверхности (определяемое по форме линий спектра) загружаются в сложную модель структуры звезды и производства энергии в ней – и мы получаем ожидаемую массу.

Во-вторых, проблемой является наша точка наблюдения. Спектроскопия измеряет доплеровское смещение, то есть круговое движение навстречу наблюдателю – или от него. В полной мере этот эффект проявляется, если мы наблюдаем двойную систему «с торца» – когда орбита перпендикулярна плоскости неба, – поскольку при каждом прохождении орбиты одна звезда движется строго навстречу нам, а другая – строго от нас. Если же двойная система расположена плашмя – орбита лежит в плоскости неба, доплеровский эффект не обнаруживается, поскольку все перемещения происходят в поперечном направлении. Двойные системы в космическом пространстве ориентированы случайным образом, и тут возникает дополнительная сложность – мы не знаем угол наклона. Но есть и плюсы: при всех углах наклонения доплеровское смещение занижает орбитальную скорость, поскольку, как правило, частично движение идет не по лучу зрения. Поэтому, вычисляя массу звезды, астрономы, как правило, могут определить только ее нижнюю границу. Но этого достаточно, поскольку наша цель – доказать, что у невидимого компаньона есть минимальная масса и потому он является черной дырой[78].

Подлинные черные дыры

Слово «астрономия» ассоциируется у нас с удивительными изображениями, полученными космическим телескопом «Хаббл».

Но многие открытия при исследовании Вселенной были сделаны благодаря спектроскопии – методу разложения света на составляющие цвета. Спектр помог Ньютону понять природу света. В начале 1800-х гг. молодой ученый Йозеф Фраунгофер, выросший в приюте под присмотром сурового наставника, едва не погибший при взрыве стекольной фабрики, где он работал, впервые детально рассмотрел солнечный спектр и обнаружил в нем данные, говорящие о химическом составе Солнца. Сто лет спустя группа низкооплачиваемых сотрудниц Обсерватории Гарвардского колледжа занялась просмотром тысяч спектров на фотографических пластинках, чтобы собрать информацию и понять, из чего состоят звезды и каков реальный размер Вселенной[79].

За свою карьеру астронома я просматривал тысячи спектров, и в каждом ждали головоломка или сюрприз. Это ключевой инструмент измерения расстояния до звезды и определения ее химического состава, он дает возможность заглянуть в центры галактик, где протекают мощнейшие процессы. Каракули, возникшие на экране после ночи астрономических наблюдений, нарисованы светом, попавшим в телескоп, разделенным спектрографом на тонкие полосы и падающим на кремниевый полупроводниковый приемник света, или ПЗС-матрицу. ПЗС-матрица обращает фотоны в электроны, а затем – в электрический сигнал, который преобразуется в карту интенсивностей на разных длинах волн.

Однажды ночью на Гавайях на вершине потухшего вулкана Мауна-Кеа (4200 м над уровнем моря) я вел наблюдения через телескоп. Данные ПЗС-матрицы были представлены в виде горизонтальных полос на экране компьютера. Мое внимание привлекла одна бледная полоса. Темные промежутки на цифровом анализаторе спектра указывали на дальнюю галактику, состоящую из тех же элементов, что и Млечный Путь. Я мог представить ее вращение, тип звезд, из которых она состояла, и количество газа в межзвездном пространстве. Красное смещение спектральных линий говорило о том, что галактика находится в 10 млрд световых лет и что этот свет начал свой путь сюда задолго до формирования Земли. Я знал, что, излучая свет, эта тусклая галактика удалялась от Млечного Пути быстрее скорости света из-за стремительного расширения Вселенной вскоре после Большого взрыва. Поскольку Вселенной управляет общий, а не специальный принцип относительности, пространство может расширяться быстрее скорости света! К стыду своему, в тот момент я даже не восхитился тем фактом, что в моем распоряжении были такие данные о Вселенной. Я редко ставил

под сомнение логику рассуждения и основы научного метода, ставшие фундаментом всего того, что я знал.

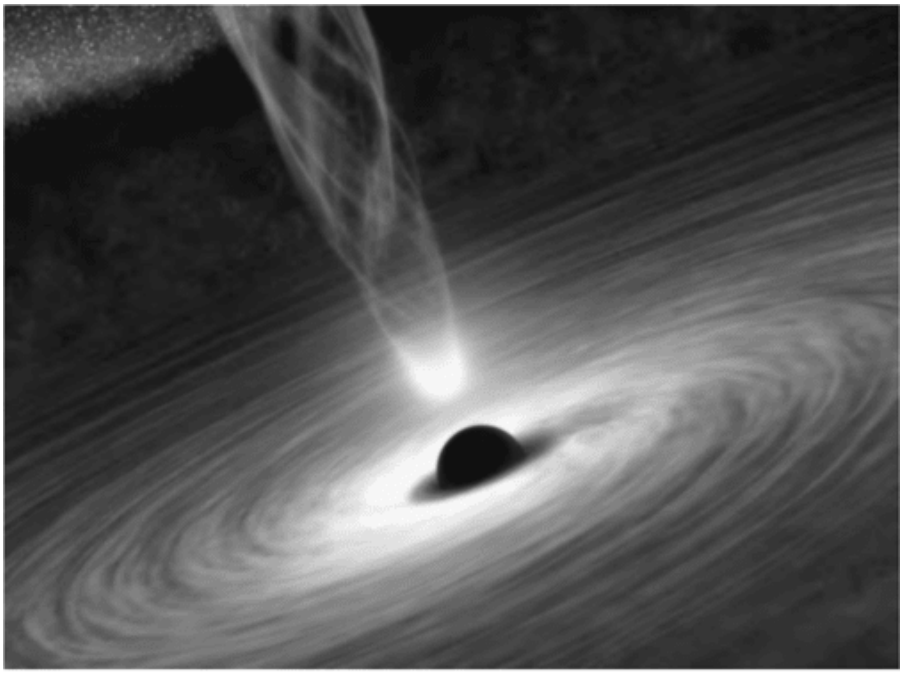
Спектроскопия – ключ к пониманию двойных звезд и их орбит. Она позволяет астрономам достаточно точно измерять массу невидимого компаньона двойной системы – что подтверждает реальность чудовищ Эйнштейна. Существует не так много «патентованных» двойных систем, где невидимый компонент имеет достаточную массу, чтобы являться черной дырой, и любая другая гипотеза их не объясняет. Давайте ближе познакомимся с эталонным объектом – Лебедем Х-1.

На летнем земном небе мы видим созвездие Лебедя, парящее высоко над нашими головами. Сосредоточимся на области возле центра креста, образующего тело лебедя. В хороший бинокль можно разглядеть бело-голубую звезду в неплотной группе горячих молодых звезд, сформировавшихся одновременно. Пять миллионов лет назад, когда наши предки-приматы образовали новую ветвь на древе эволюции, эти звезды сгустились из коллапсирующего облака газа и пыли. Интересующая нас бело-голубая звезда находится в 6000 световых лет возле края соседнего спирального рукава Млечного Пути. Это колоссальное расстояние – 32 000 трлн км. Звезда должна быть чрезвычайно яркой – чтобы мы легко увидели ее с такого расстояния, и излучать в 400 000 раз больше энергии, чем Солнце. Это старый свет. Он покинул звезду, когда на нашей планете проживало менее миллиона человек, а в Северной Америке не совсем вымерли мамонты.

Мы осторожно подкрадываемся к добыче. На том же расстоянии, что от Земли до Солнца, звезда казалась бы ослепительно яркой, в 20 раз больше Солнца – шириной с ладони вытянутых рук. Этот голубой сверхгигант находится на орбите с периодом обращения шесть дней в паре с почти невидимым компаньоном, и расстояние между ними меньше, чем между Меркурием и Солнцем. Однако компаньон не совсем темный. Голубой сверхгигант – термоядерный реактор чудовищной мощи, извергающий в космос плазменный ветер из верхних слоев своей атмосферы. Часть этого вещества притягивается компаньоном, закручиваясь в диск, состоящий из чрезвычайно горячего газа. При температуре свыше миллиона градусов газовый диск испускает мощное ультрафиолетовое и рентгеновское излучение. Гравитация компаньона деформирует внешнюю оболочку сверхгиганта, придавая ей форму капли, узкий конец которой направлен в сторону компаньона. Если бы мы двинулись в указанном направлении и приблизились к вращающемуся диску, который свидетельствует о наличии компаньона, то увидели бы в

центре диска маленькую и совершенно темную точку – черную дыру (илл. 14).

Это умозрительное описание, мы никогда не наблюдали ни этой, ни любой другой черной дыры вблизи. Тем не менее Лебедю X-1 посвящено больше сотни научных статей, это один из самых активно изучаемых объектов в небе. Орбитальный период был измерен с изумительной точностью: 5,599829 дня с погрешностью одна десятая секунды[80]. Нужно знать массу и наклон орбиты сверхгиганта, чтобы рассчитать массу его компаньона. Спектроскопия и детальное моделирование показывают, что HDE226868 примерно в 40 раз массивнее Солнца[81]. Измерить наклонение орбиты сложнее, поскольку темный компаньон никогда не оказывается позади видимой звезды, иными словами, в системе не наблюдаются затмения. Недавняя работа оценивает наклонение в 27 градусов, из чего следует, что масса темного компаньона в 15 раз больше, чем у Солнца[82]. Это намного больше максимальной массы звездных остатков для образования нейтронной звезды; гравитация настолько сильна, что этот компактный компаньон может быть только черной дырой. Никакие неопределенности данных и моделирования не влияют на достоверность вывода[83]. К 1990 г. Стивен Хокинг счел его достаточно весомым, чтобы прикатить в кабинет Кипа Торна в Калтехе и подписать на стене договор, признав себя проигравшим.



Илл. 14. Полностью изолированную черную дыру невозможно обнаружить. В двойной системе с массивной звездой черная дыра перекачивает вещество компаньона в аккреционный диск, и этот газ настолько разогрет, что испускает рентгеновское излучение. Аккреционный диск спирально закручивается вокруг горизонта событий вращающейся вокруг своей оси черной дыры. *NASA / Лаборатория реактивного движения — Калтех*

Звезды достаточно массивные, чтобы умереть черными дырами, очень редки. Галактика Млечный Путь содержит около 400 млрд звезд, большинство из них – это тусклые красные карлики, гораздо менее массивные, чем Солнце. На основании немногочисленных подтвержденных данных о существовании черных дыр в окрестностях Солнца мы можем оценить общее их количество во всей Галактике примерно в 300 млн. Несколько десятков «патентованных» экземпляров – это бесконечно малая доля от общего числа черных дыр, которое, в свою очередь, составляет ничтожно малую часть всех звезд.

За последние лет десять эксперты опубликовали списки из 25–30 «патентованных» кандидатов в черные дыры[84]. Их число растет медленно – ввиду специфических стандартов. Все они входят в двойные системы с орбитами, измеренными с предельной точностью: если темные компаньоны имеют массу больше трех солнечных, то они должны быть черными дырами. В каждом случае гипотеза подкрепляется дополнительными

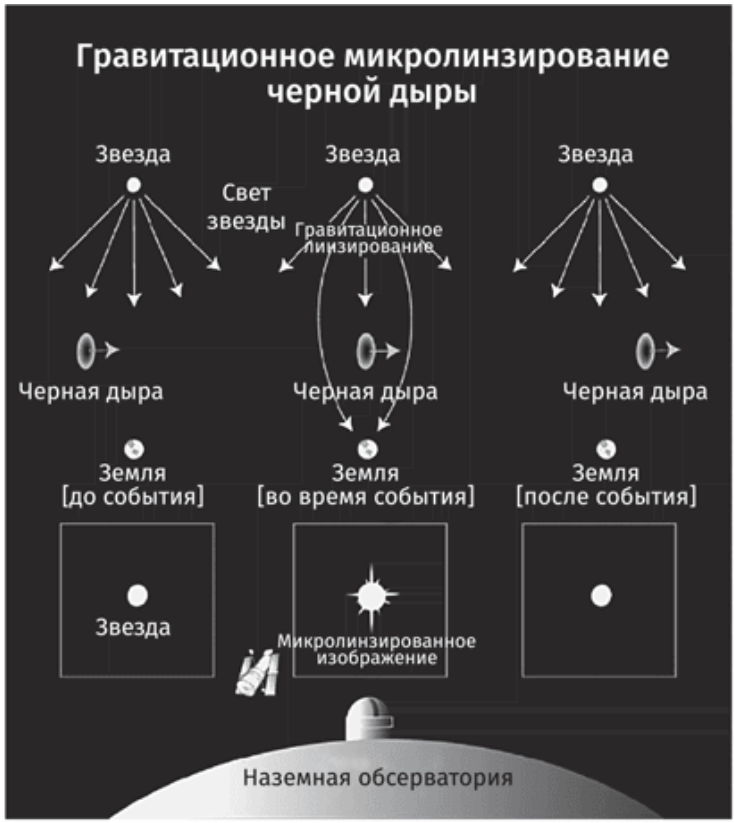
свидетельствами. Эти черные дыры в 6–20 раз массивнее Солнца, а их орбитальные периоды составляют от целого месяца до всего лишь четырех часов. Две черные дыры были найдены в ближайшей соседке Млечного Пути – галактике Большое Магелланово Облако: LMC X-1 и LMC X-3, обе удалены на 165 000 световых лет. Все остальные находятся на расстоянии от 4000 до 40 000 световых лет от Земли. Еще для 30 систем необходимо собрать более точные данные, чтобы включить их в список подлинных черных дыр.

Использование гравитационной оптики

До сих пор в нашем рассказе возможность обнаружить черную дыру зависела от двойной звездной системы, в которой черная дыра является невидимым партнером. Однако есть метод обнаружения даже одинокого «темного танцора». Он основан на главном положении общей теории относительности – отклонении света любой массой. Поскольку масса искривляет свет, звезда или галактика может фокусировать и усиливать свет более отдаленного источника. Это явление называется гравитационным линзированием. Оно было предсказано вскоре после того, как Эйнштейн опубликовал свою теорию, но впервые наблюдалось лишь в 1979 г., при получении двух изображений одного квазара: раздвоение было обусловлено скоплением галактик, пересекающим линию наблюдения.

Линзирование – не столь заметный эффект: одинокая звезда недостаточно массивна, чтобы существенно искривить свет. В 1919 г. Эддингтон измерил отклонение света дальней звезды, проходящего мимо края солнечного диска, и получил две угловые секунды – одну тысячную углового диаметра Солнца. Линзирование еще и редкий эффект, наблюдать его очень сложно. Межзвездное пространство обширно, и сближение в нем двух тело маловероятно. Шансы составляют один на миллион, следовательно, ради одного события, возможно, придется наблюдать за миллионом звезд. Если ближняя звезда проходит непосредственно перед дальней, эффект называется микролинзированием. При микролинзировании угол отклонения луча света слишком мал, чтобы наблюдалось раздвоение объекта, но имеет место гравитационное усиление света фоновой звезды. Наблюдатель видит временное увеличение яркости фоновой звезды, когда перед ней проходит звезда ближнего плана. Чем тяжелее ближняя звезда, тем дольше наблюдается эффект. Поскольку линзирование определяется массой, а не светимостью, временное увеличение яркости происходит и в том случае, если

ближняя звезда – линза – вообще не излучает света (илл. 15). Это единственный способ обнаружить изолированную черную дыру[85].



Илл. 15. Изолированные черные дыры можно обнаружить, зная о том, что масса искривляет свет. Если черная дыра проходит прямо перед отдаленной звездой, то действует как линза, и свет звезды на короткое время усиливается. Раздвоение изображения слишком незначительно и не наблюдается через телескоп. *NASA / ЕКА*

Преимуществом микролинзирования является то, что это простой и прямой метод. В случае с двойной звездной системой есть две массы, которые нужно измерить, наклонение орбиты – часто неизвестно и параметры, получаемые опосредованно при помощи спектроскопии. Линзирование требует единственного уравнения, связывающего увеличение яркости с массой и расстоянием до линзы. При типичных массах черных дыр увеличение яркости длится сотни дней, поэтому его легко заметить. Недостаток метода состоит в том, что увеличение яркости – это однократное событие, в отличие от постоянного

орбитального движения двойной системы, позволяющего в дальнейшем получить больше данных. Когда черная дыра проходит перед отдаленной звездой, их можно сравнить с кораблями, расходящимися в ночи. Сигнал не повторяется. Еще важнее то, что в уравнении линзирования участвуют удаленность и масса, следовательно, если нет дополнительной информации, позволяющей вычислить расстояние, масса остается неопределенной.

Охотиться за черными дырами методом микролинзирования – словно искать иголку в стоге сена. Исследования на основе этого метода были разработаны с целью поиска MACHO – массивных компактных гало-объектов, возможно, объясняющих феномен «темной материи», которой в нашей Галактике в шесть раз больше по массе, чем обычной материи. Это могут быть любые объекты, темные или очень тусклые, как черные дыры, нейтронные звезды, коричневые карлики (объекты дозвездной массы) или свободнолетящие планеты. Микролинзирование не помогло обнаружить MACHO, но исследования, целью которых был поиск темной материи, все-таки нашли (немногочисленные) черные дыры[86]. Одна звезда из миллиона подвергается микролинзированию, но лишь 1 % из этой выборки линзируется черными дырами, следовательно, чтобы обнаружить одну-две черные дыры, необходимо отслеживать несколько сотен миллионов звезд. Польская исследовательская группа изучила данные десятилетних наблюдений через 1,3-метровый телескоп и выявила трех убедительных кандидатов в черные дыры из миллиардов фотометрических измерений 150 млн звезд[87]. Вот это целеустремленность!

Физика на краю Мальстрема

Главный герой рассказа Эдгара Алана По «Низвержение в Мальстрем», написанного в 1841 г., – молодой человек, резко постаревший в ожидании вероятной смерти в водовороте у берегов Норвегии. Один из его братьев гибнет в бездне, второй сходит с ума от увиденного. Только рассказчик выживает, чтобы поведать о случившемся[88]. Он с содроганием вспоминает: «Водоворот этот был опоясан широкой полосой сверкающей пены; но ни один клочок этой пены не залетал в пасть чудовищной воронки: внутренность ее, насколько в нее мог проникнуть взгляд, представляла собой гладкую, блестящую, черную, как агат, водяную стену…»[89]

Вымышленный рассказчик По видит в этом водовороте

странную и ужасную красоту. Нечто подобное можно испытывать, наблюдая черные дыры. Чудовища Эйнштейна страшны и чарующи. По краям водоворота кружатся останки кораблей, сверкают брызги и пена. Черная дыра в двойной системе также весьма зрелищна. Удивительная ирония астрономии: совершенно невидимые объекты могут стать ярчайшими во Вселенной. Все дело в гравитации.

В качестве земного примера рассмотрим плотину Итайпу на границе между Бразилией и Парагваем. Это плотина ГЭС, вырабатывающей колоссальную энергию – 100 тераватт-час в год, – достаточную для удовлетворения потребностей в энергии нескольких миллионов человек[90]. Откуда берется эта энергия? Плотина поднимает воду реки Параны. Каждую секунду 300 000 куб. м воды падают с высоты 110 м, преобразуя гравитационную потенциальную энергию в кинетическую энергию воды, ускоренной до 45 м/с. У основания плотины скорость воды снижается в десять раз, поскольку ее кинетическая энергия переходит в энергию вращения лопаток турбины: вращающаяся турбина вырабатывает электроэнергию. Подобным образом вещество, падающее в черную дыру, выделяет энергию.

Посмотрим, что происходит, когда вещество падает в черную дыру. Этот процесс называется аккрецией. Черные дыры притягивают главным образом газообразный водород, который образует звезды и, разреженный, заполняет пустое межзвездное пространство. Его протоны и электроны *могли бы* следовать прямо внутрь – проваливаться за горизонт событий и исчезать в черной дыре, навсегда ускользая от нашего взора. Однако это крайне маловероятно, поскольку лишь немногие частицы газа будут двигаться прямиком к черной дыре; в большинстве они будут двигаться поперечно. Это движение может привести к тому, что частица навсегда улетит в космическое пространство или окажется на орбите вокруг черной дыры. Частицы также будут сталкиваться, поскольку летят по разным траекториям. Таким образом, движение частиц к дыре беспорядочно и хаотично, а столкновения приводят к разогреву газа.

Большая часть газа концентрируется в аккреционном диске вокруг экватора черной дыры, и области над ее полюсами оказываются относительно пустыми. И это значит, что часть горячего газа уходит через полюса. При этом энергия вращения из черной дыры превращается в кинетическую энергию. Газ выбрасывается в пространство в виде парных струй быстро движущихся частиц по оси вращения черной дыры. Эти струйные выбросы – джеты – уносят малую часть гравитационной энергии вещества, падающего в черную дыру. Если бы мы могли

приблизиться к аккреционному диску, то увидели бы невероятные искажения, обусловленные искривлением света из-за мощной гравитации черной дыры (илл. 16).

Илл. 16. Изображение, полученное в результате компьютерного моделирования черной дыры и окружающего ее аккреционного диска с использованием полных уравнений общей теории относительности. Более яркая левая часть диска приближается, более темная правая — удаляется. Искажения обусловлены светом, искривленным массой. Обратите внимание, что дальняя сторона диска не закрыта черной дырой, поскольку гравитационное линзирование позволяет нам видеть то, что находится позади нее. *Дж. А. Марк / Национальный центр научных исследований*

Представим спирально закручивающийся диск газа, похожий на брызги и пену по краям водоворота из рассказа По. Центром происходящего является вращающаяся вокруг своей оси черная дыра, мрачная и беспощадная. Чем ближе к ней оказываются частицы, тем быстрее они движутся. Их гравитационная энергия преобразуется в кинетическую. Они сталкиваются друг с другом, и газ разогревается, а трение внутри диска вызывает сильное тепловое излучение. Газ в аккреционном диске имеет температуру миллионы градусов и ярко светится в рентгеновском диапазоне.

Таким образом, гравитационная энергия превращается в излучение. Поразительно, что настолько темный объект может создать такую яркую картину. Процесс чрезвычайно эффективен. В данном случае эффективность определяется той частью аккумулированной энергии, которая превращается в излучение. Химический процесс горения, обеспечивающий бо?льшую часть

энергии на Земле, имеет эффективность 0,0000001 %. Эффективность термоядерного синтеза в звездах, обусловливающего их свечение, чуть меньше 1 %. Аккреция в стационарную черную дыру имеет эффективность 10 %, во вращающуюся – 40 %[91]. Черные дыры – самые мощные источники энергии в природе.

Газ не моментально попадает в черную дыру из-за момента импульса[92]. То же самое относится к планетам, вращающимся вокруг Солнца. Детальная проработка процесса аккреции на черную дыру являлась одной из самых сложных проблем в астрофизике: почти два десятилетия над ней бились десятки исследователей[93]. Частицы газа в аккреционном диске подвергаются трению, поэтому весь диск ведет себя так, словно он вязкий. В результате одна часть вещества теряет момент импульса и приближается к черной дыре, а другая часть приобретает момент импульса и удаляется от нее. Частицы, оказавшиеся вблизи внутреннего края диска, движутся почти со скоростью света. Приближаясь к горизонту событий, типичная частица медленно проходит сквозь аккреционный диск по спирали, теснясь и толкаясь в массе остальных частиц. Затем на внутреннем крае аккреционного диска гравитация затягивает ее прямо в черную дыру. В этой последовательности событий черная дыра набирает массу.

Предел аккреции вычислил сэр Артур Эддингтон в начале XX в. Предел Эддингтона, опирающийся на сферическую геометрию, показывает, в какой момент сила гравитации, тянущая частицу внутрь, компенсируется давлением излучения, выталкивающего частицу наружу. Максимальный темп увеличения массы черной дыры относительно низок: за год она может вырасти не больше, чем на треть массы Луны. Такими темпами ей потребуется 30 млн лет, чтобы удвоить свою массу. Однако эффективное преобразование падающей в дыру массы в исходящее излучение говорит о том, что черная дыра – ослепительно яркая. Черная дыра, питаемая газом звезды-компаньона, может быть в 100 раз ярче звезды той же массы.

Экскурсия в бестиарий двойных звезд

Малая доля звезд оканчивает свою жизнь нейтронными звездами; тех, которые становятся черными дырами, еще меньше: десятые доли процента. Черные дыры редки, как черные лебеди. Повторюсь, распределение масс формирующихся звезд имеет очень сильный перекос в сторону малой массы, и на каждую солнцеподобную звезду приходятся сотни маловесных красных

карликов. Красные карлики умирают затухающими угольками – так называемыми белыми карликами. Таким образом, более 95 % всех звезд окончат жизнь белыми карликами, а не нейтронными звездами или черными дырами.

Лишь чуть больше половины всех звезд являются одиночными, как наше Солнце, тогда как треть входит в двойные системы, а 10 % – в системы с тремя компаньонами или более[94]. В большинстве своем двойные звезды – это широкие пары с орбитальными периодами продолжительностью годы, десятилетия или даже столетия, поэтому они не взаимодействуют и не влияют на эволюцию друг друга. Малая часть двойных звезд – меньше 5 % – имеет орбитальные периоды от нескольких часов до нескольких недель.

У любой звезды есть условная граница, в пределах которой все вещество гравитационно привязано к ней. У изолированной звезды эта граница является сферой. Если двойные звезды расположены близко друг к другу, их границы вытягиваются в виде капель, соприкасающихся острыми концами. Масса может перетекать от одной звезды к другой через точку соприкосновения капель. Обычно более массивная звезда высасывает газ из менее массивной. Если они расположены в тесном соседстве, воображаемая граничная поверхность сливается в общую оболочку и масса легко перемещается между звездами[95].

В основном тесно связанные двойные системы состоят из двух красных карликов, поскольку среди звезд преобладают карлики. Когда эти звезды гибнут, то коллапсируют в белые карлики, но звезды малой массы живут долго, и большинство из них еще не умерло. Массивные звезды живут мало, поэтому если мы обнаруживаем двойную систему из звезд большой и малой масс, то, вероятно, более массивная звезда умерла и оставила после себя нейтронную звезду или черную дыру.

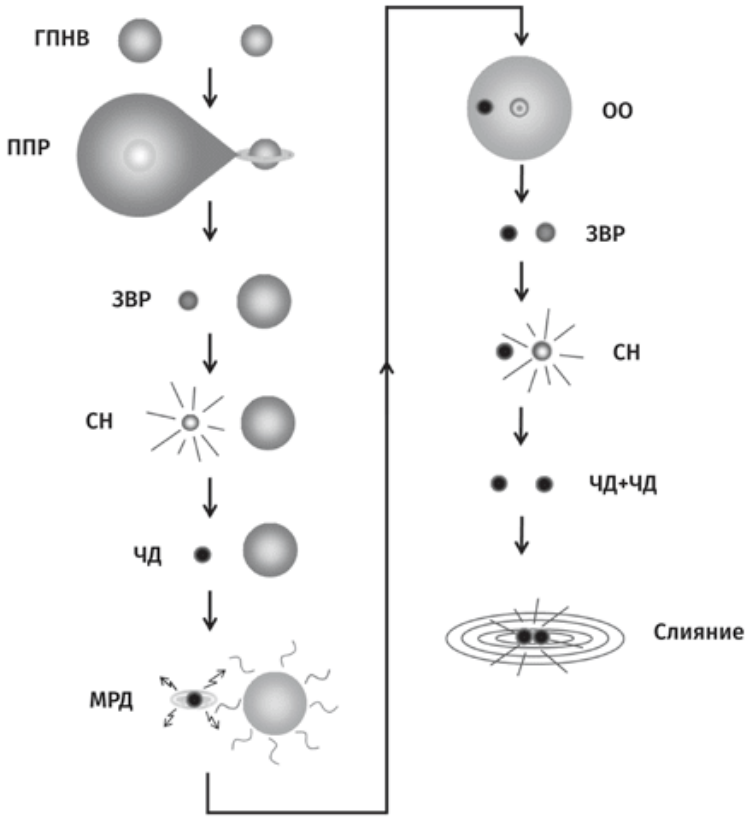
Перечислю типы звездных остатков в двойных системах в порядке уменьшения распространенности: двойной белый карлик, белый карлик и нейтронная звезда, белый карлик и черная дыра, двойная нейтронная звезда, нейтронная звезда и черная дыра, наконец, двойная черная дыра. Последний вариант можно назвать двойной черной жемчужиной: это редчайшее сочетание. Мы к нему еще вернемся.

Чтобы рассказать все, что известно о двойных звездах, придется написать книгу намного толще этой. Как и пары людей, они очень разные. Пары бывают большие и маленькие, «личности» в них – горячие и холодные. Обе стороны что-то дают и что-то берут, и жизнь одной стороны оказывает колоссальное

влияние на другую. Иногда партнеры разрывают отношения, один из партнеров почти неизбежно умирает раньше другого. В случае со звездами близкие отношения могут даже дать жизнь после смерти.

Рассмотрим две обычные звезды, обращающиеся вокруг общего центра масс, – они в самом расцвете жизни, синтезируют гелий из водорода. Более массивная звезда истратит свой водород раньше и вырастет в красный гигант, изливая газ на компаньона. Обе звезды купаются в газе и сближаются по спирали. Более массивная звезда умирает, коллапсируя в белый карлик. В конце концов менее массивная звезда стареет и увеличивается, выбрасывая газ на свою мертвую спутницу. Очень сильная гравитация белого карлика сжимает этот газ настолько, что запускается термоядерный синтез, и звезда ненадолго возвращается к жизни. Это так называемая новая звезда – или просто «новая». При бешеной реакции синтеза значительная часть газа выбрасывается в окружающее пространство, процесс может эпизодически повторяться. Иногда из бледного пятнышка, различимого лишь в телескоп, новая превращается в яркий объект, видимый невооруженным глазом[96]. При переносе большого количества вещества белый карлик может преодолеть предел Чандрасекара, равный 1,4 массы Солнца. В этом случае мертвая звезда умрет вторично – как суперновая, оставив после себя нейтронную звезду[97].

Такова история жизни двойной системы, оканчивающейся образованием черной дыры[98]. Две горячие массивные звезды вращаются по тесной двойной орбите. Более массивная из них, израсходовав водород в ядре, расширяется и сбрасывает бо? льшую часть оболочки на компаньона, причем от нее самой остается голое гелиевое ядро. Через несколько сотен тысяч лет она катастрофически гибнет во вспышке сверхновой, оставляя черную дыру. Спустя некоторое время, достигнув конца своей жизни, менее массивный компаньон также расширяется, выплескивает газ в черную дыру и продуцирует мощное рентгеновское излучение. Затем и он взрывается сверхновой, и в зависимости от массы все завершается образованием системы нейтронной звезды и черной дыры или двойной черной дыры (илл. 17).



Илл. 17. Эволюционная последовательность, ведущая к возникновению редкой системы двойной черной дыры. В верхнем левом углу: звезда начинает жизнь на главной последовательности* нулевого возраста (ГПНВ). Более массивная звезда переполняет полость Роша (ППР) и сбрасывает вещество на компаньона. По прошествии некоторого времени в фазе звезды Вольфа — Райе** (ЗВР) более массивная звезда умирает в сверхновой (СН) и становится черной дырой (ЧД). Образуется массивная рентгеновская двойная система (МРД) с излучением в рентгеновском диапазоне. Затем две звезды занимают общую оболочку (ОО). Далее аналогичным образом умирает вторая звезда. Две черные дыры со временем сольются в одну более массивную черную дыру. *Пабло Мерчант / A&A, vol. 588, p. A50, 2016, публикуется с разрешения / копирайт Европейская южная обсерватория*

---

* Область на диаграмме Герцшпрунга — Рассела, отображающей зависимость звездной величины (светимости) и спектрального класса (температуры на поверхности звезды), включающая звезды, в ядрах которых протекает термоядерная реакция синтеза гелия из водорода. — *Прим. пер.*

** Звезды Вольфа — Райе — массивные звезды с очень высокой температурой и светимостью, с пониженным относительно других звезд содержанием водорода. — *Прим. пер.*

Черные дыры – причудливое, но неизбежное следствие эволюции массивных звезд. Если они входят в двойные системы, то их взаимодействие позволяет их обнаружить. Каждую секунду где-то во Вселенной бурно умирает массивная звезда. Каждую секунду небольшой участок пространственно-временного континуума исчезает из вида, и каждую секунду рождается черная дыра.

Нет ли, однако, другого способа образования черной дыры? И что, если в результате появится нечто невообразимо чудовищное?

3. Сверхмассивные черные дыры

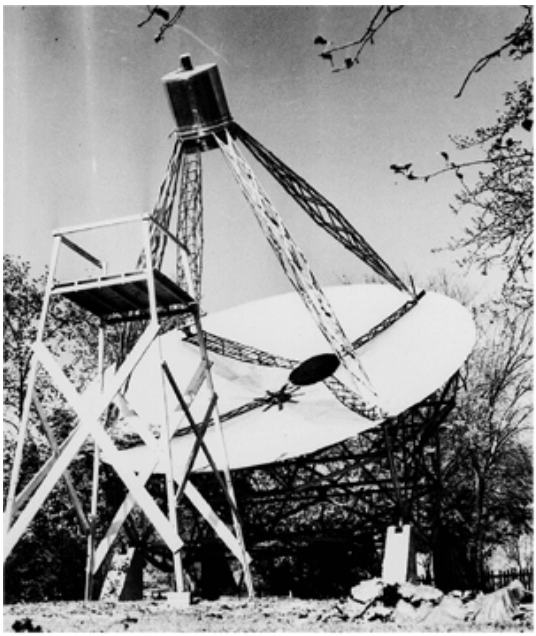
Только ли из мертвой звезды может образоваться черная дыра? Для ее возникновения нужна плотность, создающая сильнейшую гравитацию – непреодолимую для света. Теоретически такое возможно в телах, которые больше (или меньше) коллапсирующей звезды. Тем не менее открытие сверхмассивных черных дыр стало сюрпризом. Некоторые из них настолько массивны, что превышают суммарную массу всех черных дыр звездного происхождения в нашей Галактике. Еще большим сюрпризом оказалось то, что такая черная дыра имеется в центре каждой галактики.

Единственный радиоастроном в мире

Лето 1937 г. в Уитоне, штат Иллинойс, было жарким и душным. Гроуту Реберу было 26 лет, и он целыми днями пропадал на пустыре возле дома своей матери, где с семи утра до темноты резал древесину и гнул листы металла. Он строил радиотелескоп. Тарелка имела диаметр около 10 м – лучшее, что он мог создать из имеющихся материалов[99]. На тот момент это был самый большой радиотелескоп на Земле – предшественник современных приборов, достигающих 100 м в диаметре. Десять лет Ребер был единственным радиоастрономом в мире (илл. 18).

Однако он не был первым. Карл Янский, физик по образованию, уже в 23 года был принят на работу в Лаборатории Белла в Холмделе, штат Нью-Джерси. Компания хотела изучить возможности использования радиоволн длиной 10–20 м для трансатлантической телефонной связи. Янский должен был найти источник статических помех, препятствующих голосовой связи. В 1930 г. на заброшенном картофельном поле возле лаборатории он собрал антенну. Конструкция напоминала каркас крыла первых бипланов и передвигалась по кольцевому пути на четырех колесах с резиновыми шинами от «Форда» Model T. Поворачивая антенну, Янский определял направление источника радиоволн, причем радиосигналы усиливались и записывались пером на движущейся бумажной ленте в сарайчике поблизости. Главным образом он регистрировал атмосферные помехи, вызванные грозами в окрестностях, но наблюдалось и слабое шипение. В течение года Янский доказал, что это шипение имеет не земное происхождение; оно следовало звездному времени, усиливаясь и слабея с периодом не 24 часа, а 23 часа 56 минут[100]. Самое сильное излучение обнаруживалось в центре Млечного Пути, в

созвездии Стрельца. Открытие Янского наделало много шума, и 5 мая 1933 г. о нем сообщила *The New York Times*[101].



Илл. 18. Первый в мире параболический радиотелескоп, построенный радиоастрономом-любителем Гроутом Ребером в 1937 г. Первым в истории радиотелескопом являлась дипольная решетка Карла Янского. Десятиметровая тарелка находилась на заднем дворе дома Ребера в Уитоне (Иллинойс). Она стала прототипом всех будущих «тарелок», используемых в новой научной области — радиоастрономии. *Гроут Ребер*

Так родился новый метод изучения Вселенной[102]. Тысячи лет астрономических наблюдений невооруженным глазом и сотни лет с тех пор, как Галилей впервые воспользовался телескопом, вся информация из космоса поступала в узком диапазоне оптических волн, всего в два раза превышающем интервал от самого красного до самого синего цветов, различимых человеческим глазом. Теперь люди записали сигналы из совершенно другой области электромагнитного спектра. Янский предложил построить 30-метровую радиоантенну, чтобы продолжить работу. Лаборатории Белла не заинтересовались этой идеей. Янскому поручили другой проект, и больше он не занимался радиоастрономией.

Работа Янского вызвала у Ребера интерес к источнику космических радиоволн. В начале 1930-х гг. он попытался устроиться в Лаборатории Белла, чтобы работать вместе с Янским, но во времена Великой депрессии никого не нанимали. Он самостоятельно выяснил, как построить радиотелескоп и приемник. Ему нравилось работать в одиночку. Он сказал об этом так: «Никаких тебе самозваных авторитетов, лезущих с дурными советами»[103]. Ребер вошел в рабочий ритм: днем собирал радиоприемники на фабрике в близлежащем Чикаго, после ужина спал четыре-пять часов, а с полуночи до рассвета, пока его

тарелка сканировала небо, сидел в подвале, записывая радиосигналы с минутным интервалом. Постепенно он усовершенствовал приемник и купил ленточный самописец, избавившись от необходимости сидеть за этой работой всю ночь. Это позволило Реберу приступить к первому изучению радионеба.

Ребер работал один. У него не было единомышленников, не с кем было обмениваться идеями, и он имел дело с неизученными длинами волн. Представьте, что вы первый в мире скульптор. Другие рисуют и пишут красками, но больше никто не создает трехмерные произведения искусства. Если никто не говорит на вашем языке, вы обречены на одиночество. Инженеры практически не обратили внимания на работу Ребера, которую он опубликовал в журнале по радиотехнике, как сделал ранее Янский. Астрономы не проявили интереса – или отнеслись скептически. В 1940 г., подтвердив обнаружение Янским радиоволн из Млечного Пути, Ребер подал в *Astrophysical Journal* статью о явлении, названном им космическими статическими помехами. Редактор Отто Струве отправил статью нескольким рецензентам. Инженеры не поняли, при чем тут астрономия. Астрономов смутил радиожаргон. Никто не хотел рекомендовать статью к публикации, но Струве все равно решил ее напечатать[104]. Единственный радиоастроном в мире продолжил свой одинокий труд.

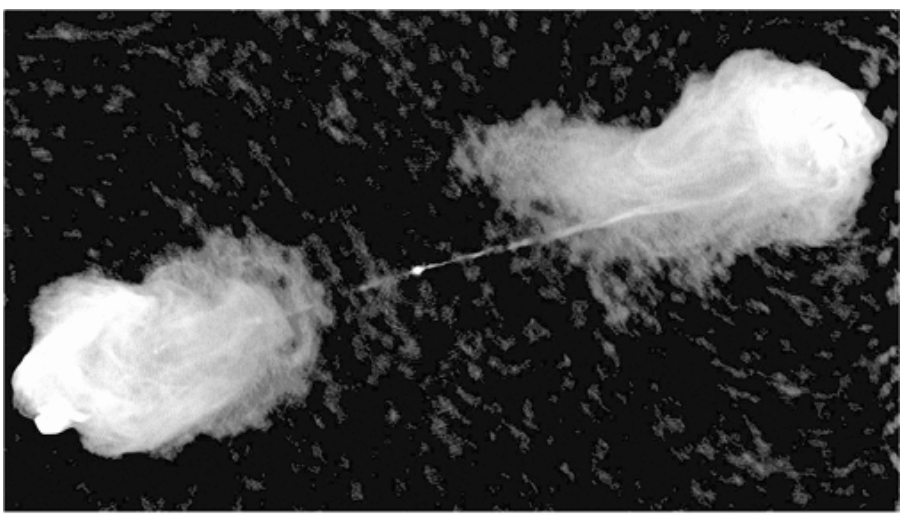
Ребер с педантичным упорством картографировал небо. Он работал со все более короткими радиоволнами, зная, что они обеспечивают более точную локализацию радиоисточника. Сочетая несколько длин волн, он мог определить физический процесс, вызывающий излучение. В 1944 г. он написал статью, к которой прилагалась первая в истории карта радионеба[105]. В статье также доказывалось, что процесс излучения космических радиоволн был нетепловым, следовательно, отличался от излучения тела с фиксированной температурой. Его карты демонстрировали концентрацию излучения в Млечном Пути и указывали еще две пиковые локации излучения – в Кассиопее и в Лебеде. Первый пик окажется остатками сверхновой в 11 000 световых лет. Второй, случайно расположенный недалеко от эталонной черной дыры Лебедь X-1, – галактикой с невероятно мощным радиоизлучением в полумиллиарде световых лет от нас.

Астрономам понадобилось время, чтобы понять природу галактики, названной Лебедь А, – самого мощного радиоисточника в небе (илл. 19). После ее открытия Ребер был признан смелым новатором. Он однажды посоветовал молодому студенту: «Выберите область, о которой известно очень мало, и специализируйтесь в ней. Однако не принимайте за непреложный

факт ни одну из готовых теорий. Если все остальные смотрят вниз, смотрите вверх или в другую сторону. Возможно, увиденное вас удивит»[106].

Галактики с яркими ядрами

Развитие науки не похоже на плавное течение реки. Ученым редко удается без проблем и препятствий приплыть по ней в море знания. Гораздо чаще они, как первопроходцы, осваивают дикую местность – то при свете дня, стабильно продвигаясь вперед, то блуждая в тумане без компаса. Идут обходными путями, заходят в тупики. Люди, следующие к одной цели, не всегда общаются, иногда они даже не знают о существовании друг друга. И очень редко кто-то оказывается настолько умным или удачливым, чтобы взглянуть на ситуацию с высоты и увидеть цельную картину.



Илл. 19. Лебедь А — один из самых мощных источников радиоизлучения в небе. Это изображение было получено с помощью радиоинтерферометра, который называется «Очень большая решетка» (Very Large Array, VLA). Яркое радиопятно в центре, как теперь известно, является сверхмассивной черной дырой в галактике в 600 млн световых лет от Земли. Джеты высокоэнергетической плазмы выходят из ядра и образуют размытые «лепестки» радиоизлучения на большом удалении от галактики. *Р. Перли, К. Карилли, Дж. Дрейер / Национальная радиоастрономическая обсерватория*

В конце XX в. среди астрономов развернулись яростные споры о природе «туманностей» – расплывчатых светлых пятен, которые

Уильям Гершель и другие ученые каталогизировали более чем за 100 лет до этого. Поскольку некоторые туманности имеют спиральную структуру и не приближены к плоскости Млечного Пути – в отличие от других туманностей, астрономы стали всерьез рассматривать гипотезу, гласящую, что это – «островные вселенные», самостоятельные звездные системы, находящиеся на огромном расстоянии от нашей Галактики. В таком случае их спектры должны были бы выглядеть как суммы спектров множества звезд, с теми же линиями поглощения, что у Солнца и других звезд. В 1908 г. Эдвард Фэт из Ликской обсерватории изучил спектр туманности NGC1068 и с удивлением обнаружил не только поглощение, но и шесть четких эмиссионных линий, которые появляются лишь тогда, когда газ нагревается каким-то чрезвычайно мощным источником энергии[107]. В то время подобные изыскания казались настолько загадочными, что их проигнорировали, и лишь через два десятилетия Эдвин Хаббл доказал, что NGC1068 является галактикой[108].

В начале 1940-х гг. Карл Сейферт, постдок в обсерватории Маунт-Вилсон в Южной Калифорнии, под руководством Эдвина Хаббла занимался исследованиями с использованием самых мощных из имевшихся на тот момент телескопов – 1,5- и 2,5-метрового[109]. Когда Сейферт собирал эти данные, в Лос-Анджелесе было в три раза меньше жителей и в десять раз меньше городских огней, чем сегодня. Небо, действительно темное из-за светомаскировки, обязательной после нападения на Пёрл-Харбор, было идеальным для наблюдения. Сейферт получил спектры ядер ярких галактик и выявил полдюжины аналогичных NGC1068, с яркими эмиссионными линиями, свидетельствующими об энергетическом процессе. Он также заметил, что эмиссионные линии очень широки. Ширина эмиссионной линии указывает на диапазон скоростей газа. Максимальная скорость вращения нормальной спиральной галактики составляет 200–300 км/с, однако в измерениях Сейферта доплеровская ширина спектральных линий составляла тысячи километров в секунду, указывая, что газ вблизи центра этих галактик движется в 10–20 раз быстрее любого другого ранее измеренного газа. Вещество, движущееся с такой скоростью, улетало бы от галактики, если бы его не удерживала какая-то огромная масса возле центра.

Сейферт столкнулся с загадкой: что могло вызвать быстрое движение газа в центре галактики? В те времена этого никто не знал. Как и статья Гроута Ребера о «космических статических помехах», которая будет опубликована в следующем году, статья Сейферта практически не вызвала реакции астрономического

мира. На нее не ссылались в течение 16 лет после публикации[110]. Класс галактик, который впоследствии был назван в честь Сейферта, ждал своего часа. Тем временем благодаря техническим достижениям радиоастрономии совершались новые открытия.

Радиоастрономия достигает зрелости

В 1940-е гг., во время войны, занятия наукой казались неуместными. Однако радиоастрономы сыграли решающую роль в создании радара, в свою очередь, имевшего принципиальное значение для исхода Второй мировой войны. В бою побеждала та сторона, которая первой замечала вражеские самолеты, корабли или подводные лодки. Британские и американские инженеры и ученые разработали радар, способный «видеть» на сотни километров даже ночью. Радар помогал топить немецкие подводные лодки, с его помощью британцы обнаруживали приближающиеся бомбардировщики и обеспечивали прикрытие при высадке союзников в Нормандии. Часто говорят, что конец войне положила атомная бомба, но победил в этой войне радар.

Радар привел и к астрономическим открытиям. В 1942 г. Стэнли Хей, работая в составе научно-исследовательской группы по изучению оперативных вопросов сухопутных войск, обратил внимание на сильные помехи в работе радаров береговой обороны Англии. Он понял, что виновник помех не враг, а Солнце. Позже в ходе войны, пытаясь выследить немецкие ракеты «Фау-2», он обнаружил ионизированные следы метеоритов. Но до конца войны нельзя было писать об этих открытиях. Группа также подтвердила существование и мощь таинственного радиоисточника Лебедь А. После войны Хей продолжил работать на военных в Научно-исследовательском центре радиолокации на юге Англии, тогда как другие специалисты, трудившиеся над радаром военного времени, стали первопроходцами в радиоастрономии. Мартин Райл основал Кавендишскую лабораторию Кембриджского университета, а Бернард Ловелл – обсерваторию Джодрелл-Бэнк, экспедиционную станцию Манчестерского университета[111].

Австралия существенно продвинулась в области радиоастрономии благодаря техническому опыту, приобретенному в годы войны в рядах союзников. Одна из лучших в мире лабораторий радиолокации находилась в Сиднее. После войны она полностью сохранилась, и ее персонал переключился на исследование космического «радиошума». Стоит упомянуть о Руби Пэйн-Скотт, она была одним из лучших

физиков в истории Австралии и первой в мире женщиной-радиоастрономом. Она работала на армию в военные годы, а после стала первым ученым, занявшимся изучением солнечных радиовспышек, и разработала математический аппарат для интерферометрии, использующейся в радиомассивах по всему миру. На протяжении всей своей карьеры Руби Пэйн-Скотт сталкивалась с сексизмом и вынуждена была скрывать факт замужества, поскольку в те времена замужним женщинам не позволялось работать госслужащими на полной ставке[112].

Европейская астрономия получила мощный импульс развития в конце войны, когда в обсерватории Британии, Нидерландов, Франции, Швеции и Чехословакии вывезли 7,5-метровые антенны немецких радиолокационных станций. Это счастливая история о превращении оружия в инструмент научного познания.

В 1946 г. Стэнли Хей и его коллеги с помощью модифицированной антенны противовоздушного радара доказали, что Лебедь А ежеминутно меняет интенсивность. Поскольку за столь малый промежуток времени свет может пройти строго определенное расстояние, любая временная шкала изменений задает размерную шкалу источника излучения. Быстрые изменения можно заметить только тогда, когда источник очень мал. В данном случае было установлено, что объект действительно невелик – размером со звезду. Мартин Райл предположил, что Лебедь А может быть звездой нового типа, яркой в радиодиапазоне, но невидимой в оптическом, – «радиозвездой». Это всех озадачило[113]. Такие звезды, как Солнце, слабо излучают радиоволны, как же звезда может быть настолько ярким радиоисточником? Как сказал радиоастроном Дж. Г. Дэвис: «Оказалось, есть оптическая вселенная и радиовселенная, совершенно не похожие друг на друга и в то же время сосуществующие. Было очевидно, что их нужно как-то связать воедино»[114].

Но на пути у радиоастрономии встало угловое разрешение: наименьший угол, различаемый каким-либо телескопом. Чем лучше угловое разрешение, тем меньше этот угол. Если расстояние между источниками света меньше углового разрешения телескопа, они сливаются. Угловое разрешение влияет и на глубину видения: если источники накладываются друг на друга, невозможно определить, какой из них ближе, а какой дальше. Представьте себе близорукого человека в комнате, полной людей. Он сможет рассмотреть ближайшие к нему лица, но все остальное безнадежно сольется. Будет сложно даже пересчитать всех присутствующих. Стоит надеть очки, и все

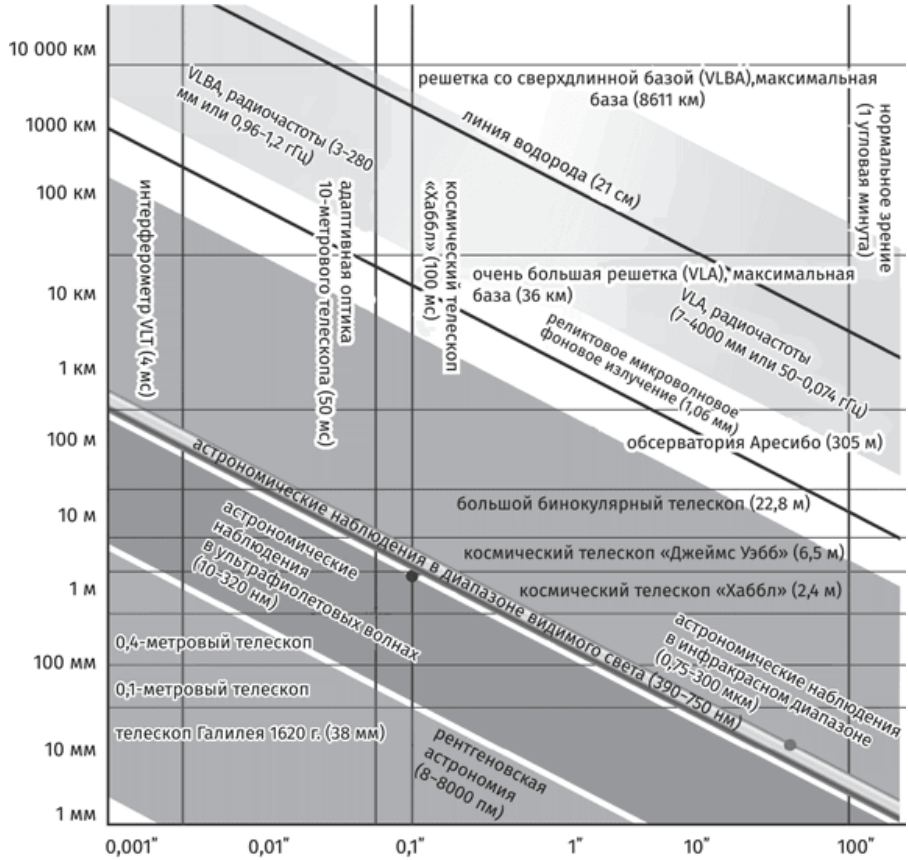
оказывается в фокусе.

Для получения более четкого изображения нужны или более короткие волны, или больший телескоп[115]. Угловое разрешение прямо пропорционально длине волны, на которой ведется наблюдение, и обратно пропорционально размеру телескопа. Радиоволны в миллионы раз длиннее световых волн, поэтому радиоастрономия оказывается в невыгодном положении по сравнению с оптической астрономией – где недостатки можно компенсировать, среди прочего постройкой больших телескопов. Диаметр тарелки Гроута Ребера был почти 10 м – больше любого оптического телескопа того времени. Самые четкие изображения имели поперечный размер 15 градусов – это ширина кулака на расстоянии вытянутой руки. На столь обширном небесном участке много оптических объектов, поэтому Ребер не смог установить источник радиоволн. Переходом на более высокие частоты, что означает более короткие волны – 20 см, а не 2 м, можно увеличить резкость в десять раз. Для сравнения: волны видимого света в 2 млн раз короче двухметровых волн, которые наблюдал Ребер. Оптический телескоп того же диаметра, что у Ребера, давал бы в 3 млн раз более четкую картинку[116]. Чтобы добиться той же резкости, что и у метрового оптического телескопа, нужен радиотелескоп величиной с Соединенные Штаты!

Эту проблему решило изобретение, сделанное в интерферометрии. В интерферометре приходящие волны от двух (или более) радиотелескопов объединяются с информацией о фазах волн – а именно с точным временем регистрации гребней и ложбин. Тогда угловое разрешение определяется не величиной одного телескопа, а расстоянием между ними: две десятиметровые тарелки, разнесенные на 1 км, имеют угловое разрешение в 100 раз выше, чем каждая из них в отдельности[117]. Этот метод также называется апертурным синтезом, поскольку «синтезирует» телескоп с разрешающей способностью существенно большего телескопа. В 1950 г. Грэм Смит из Кавендишской лаборатории Кембриджского университета с помощью использованных не по назначению немецких антенн измерил положение яркого радиоисточника Лебедь А с точностью до угловой минуты, или одной тридцатой доли диаметра Луны, что было невероятным прорывом (илл. 20).

Точно измеренное положение Лебедя А заинтересовало Вальтера Бааде, астронома из Калтеха. Через две недели после получения данных от Смита Бааде оказался в помещении для наблюдателя пятиметрового телескопа на горе Паломар – самого мощного оптического телескопа в мире. Во время войны

астроному немецкого происхождения не позволили вступить в действующую армию, поэтому он, как и Карл Сейферт, воспользовался светомаскировкой Лос-Анджелеса, чтобы сделать фотографии ночного неба беспрецедентной глубины. В одном из последних интервью журналист живо описал ученого: «Когда он рассказал, что увидел и открыл в ходе тщательного изучения тысяч фотопластинок, за цифрами, изображениями и астрономическим трепом стал проступать невероятный масштаб космоса, мира галактик и межгалактического пространства. Этот человек в сером костюме с синим галстуком и в коричневых ботинках огромного размера был совершенно поглощен своими исследованиями. Энергично жестикулирующий, беспрерывно курящий, с тщательно расчесанными на пробор редкими седыми волосами, белыми кустистыми бровями и выдающимся ястребиным носом, Бааде относился к тайнам Вселенной как к крупнейшим детективным расследованиям и сам являлся одним из главных сыщиков»[118].



Илл. 20. Логарифмический график зависимости размеров телескопа и углового разрешения, или способности различать мелкие детали астрономического объекта. Для сравнения: угловой размер Луны составляет 1800 угловых секунд (″). Точка с координатами 10 мм и 20″ соответствует невооруженному глазу; точка с апертурой 2,4 м и разрешением 0,1″ — это космический телескоп «Хаббл». Длины волн электромагнитного излучения показаны диагональными линиями; они увеличиваются от рентгеновских лучей в левом нижнем углу до радиоволн в верхнем правом. Самые большие одиночные телескопы — около 10 м в оптическом диапазоне и около 300 м на радиоволнах. Интерферометры имитируют очень большой телескоп, поэтому обеспечивают очень высокое угловое разрешение. *Крис Импи*

Когда Бааде направил пятиметровый телескоп – называемый «большой глаз» – на Лебедь А, полученные фотопластинки привели его в изумление: «Уже просматривая негативы, я понял, что столкнулся с чем-то необычным. По всей пластинке были разбросаны галактики – больше двухсот, и самая яркая – в центре. С признаками приливных деформаций, гравитационного

притяжения между двумя ядрами; я еще не видел ничего подобного. Я мог думать только об этом: я ехал домой ужинать, но решил остановить машину и поразмыслить»[119]. Вместе радиоастрономия и оптическая астрономия смогли ответить на важный вопрос: Лебедь А оказался дальней деформированной галактикой. Ее спектральные линии были смещены в красную область на 5,6 %, и это говорило о том, что она удаляется от нас со скоростью 15 600 км/с. В модели расширяющейся Вселенной, где красное смещение является показателем расстояния, это означает, что до нее – 750 млн световых лет. Радиоволны, которые мы сейчас видим, рождались в тот момент, когда обитатели Земли были размером с булавочную головку.

Бааде размышлял об энергии, которая, возможно, выделялась в результате космических «крушений», и предположил, что сверхъяркий Лебедь А состоит из двух столкнувшихся галактик. Рудольф Минковский, коллега Бааде в Калтехе, оспорил его теорию, и Бааде предложил поспорить на $1000. (Физики-теоретики, изучающие черные дыры, очевидно, не единственные азартные ученые.) В те времена это была месячная зарплата. Минковский отказался, и Бааде понизил ставку до бутылки виски, которую Минковский проиграл, получив спектр с эмиссионными линиями очень горячего газа у центра Лебедя А. При столкновении двух галактик содержащийся в них газ нагревается. (Бааде впоследствии жаловался, что Минковский расплатился плоской бутылкой виски вместо полноразмерной, да и ту выпил сам во время следующего визита.) Впрочем, в дальнейшем после точных расчетов некоторые теоретики пришли к выводу, что столкновение галактик не объясняет яркости радиосвечения. Главный вопрос – как *вообще* Лебедь А может излучать в радиодиапазоне в 19 млн раз больше энергии, чем Млечный Путь, – остался без ответа.

Астроном из Нидерландов открывает квазары

В 1950 г. был предложен новый механизм возникновения космических радиоволн[120]. Если электроны движутся в магнитном поле с околосветовой скоростью, они перемещаются по спирали и создают сильное излучение в широком диапазоне длин волн – так называемое синхротронное излучение. Синхротронное излучение было получено в лабораторных ускорителях в 1940-х гг., но неожиданно оказалось, что этот процесс может происходить и при ускорении частиц в космосе, когда они разгоняются в областях протяженностью в сотни или тысячи световых лет. В 1958 г. на международной конференции

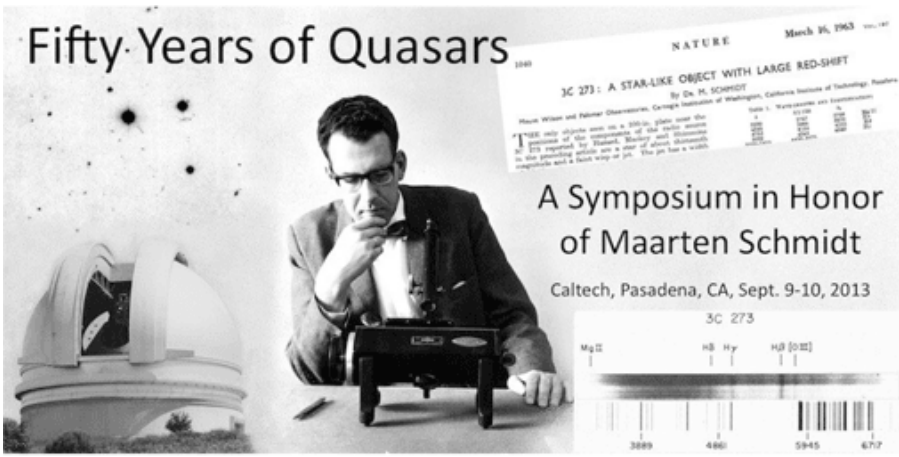
астрофизиков в Париже ученые выступили с докладами, утверждая, что синхротронное излучение может объяснить солнечные вспышки, послесвечение сверхновой 1054 г. в Крабовидной туманности, необычность эллиптической галактики M87, а также, возможно, Лебедь А.

В 1959 г. кембриджские радиоастрономы опубликовали третий каталог. Оптическая астрономия обратила внимание на самые компактные источники радиоволн – это сулило хороший шанс найти соответствующий им оптический объект[121]. Как и раньше, в центре событий оказались астрономы Калтеха. Наблюдая 48-й объект из каталога – 3C 48, Том Мэтьюс и Алан Сэндидж обнаружили в направлении источника радиоизлучения бледно-голубой объект, окруженный тусклой туманностью. Свет менялся быстро: объект не мог сильно превышать размеры звезды. Загадочным оказался его спектр с яркими широкими эмиссионными линиями, которые не удалось связать ни с одним известным элементом. Мэтьюс показал находку Джесси Гринстейну, эксперту по звездам, но и тот никогда не видел такого звездного спектра. Гринстейн, не найдя объяснений, сунул картинку в ящик стола и забыл о ней.

Следующий шаг сделал Мартен Шмидт. Молодой голландский астроном приехал в Калтех изучать образование звезд в галактиках, но непонятный источник его заинтриговал. В 1963 г. австралийские радиоастрономы во время затмения 273-го объекта каталога 3C Луной сумели очень точно измерить положение источника. Через пятиметровый телескоп Шмидт увидел похожий на звезду голубой объект со спектральными линиями, смещенными к краю спектра. Спектр объекта содержал загадочные эмиссионные линии, подобные тем, что наблюдались в 3C 48. Шмидт попытался сопоставить рисунок линий с каким-нибудь хорошо известным элементом и понял, что это линии водорода, сдвинутые в красную область на 16 %. Если объяснять красное смещение расширением пространства, то 3C 273 удаляется от нас с немыслимой скоростью – 45 000 км/с. Четыре классические статьи с описанием открытия Шмидта были опубликованы в журнале *Nature*[122].

Через 50 лет Мартен Шмидт вспоминал момент открытия: «Я стал интерпретировать находку как космологическое красное смещение – потому что это был очень яркий объект в небе, как оказалось, с очень высокой светимостью. Что примечательно, потому что объект был несопоставимо ярче обычных галактик, даже самых больших. Итак, у вас есть нечто далеко во Вселенной, оно ярче целой галактики и выглядит как звезда. Это было ошеломляюще»[123] (илл. 21).

Благодаря находке Шмидта Гринстейн вспомнил о спектре 3C 48 и быстро опознал линии обычных химических элементов, более чем дважды смещенные в красную область – на 37 %[124]. Объект 3C 273 оказался удален на 2 млрд световых лет, а 3C 48 – на 4,5 млрд световых лет, его свет рождался, когда Земля только формировалась, и с тех пор летел сквозь космос. Оба объекта меньше Солнечной системы, но излучают в 100 раз больше света, чем целая галактика. Мартен Шмидт предложил новый термин для обозначения этого экстраординарного класса объектов – квазизвездный радиоисточник, или квазар.



Илл. 21. Фотомонтаж, сделанный для симпозиума в честь 50-й годовщины открытия квазаров Мартеном Шмидтом. Слева: пятиметровый телескоп Паломарской обсерватории и изображение квазара 3C 273. В середине: Мартен Шмидт изучает спектр, полученный с помощью этого телескопа. Справа: спектр 3C 273 с эмиссионными линиями, отмеченными справа, и длинами волн, отмеченными снизу, а также титульный лист статьи с сообщением об открытии. *Г.Джорговски / Калифорнийский технологический институт*

Поскольку основная работа велась в Лос-Анджелесе (Пасадену давно поглотил растущий город), мы будем использовать мегаполис в качестве аналогии. Представьте, что ночью вы пролетаете высоко в небе над Лос-Анджелесом на вертолете. В городе с населением около 10 млн человек, где на каждого жителя приходится примерно десять источников света от домов, улиц и машин, получаем в сумме около 100 млн огней (для простоты я округлил числа до ближайших порядков). Если бы Лос-Анджелес был галактикой, каждый источник света представлял бы примерно 1000 звезд. Представьте теперь, что в

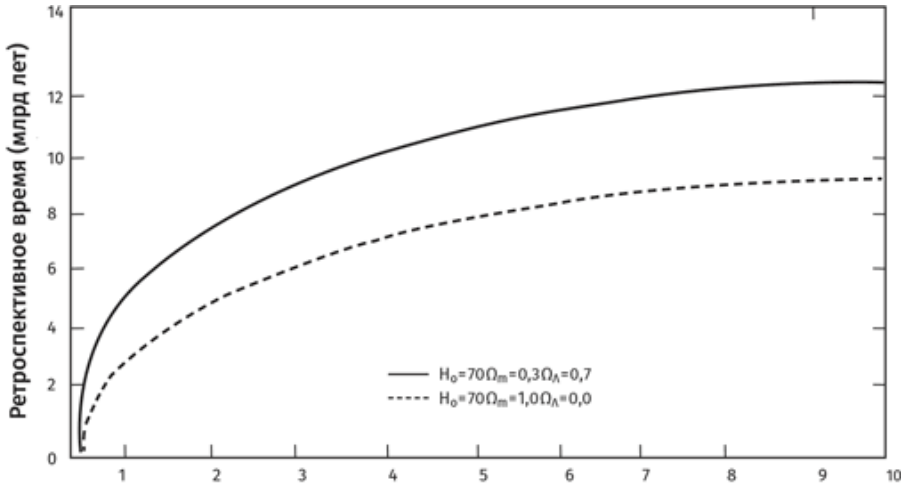
деловом центре Лос-Анджелеса есть одиночный источник, сияющий в несколько сот раз ярче, чем весь город, хотя размером он всего несколько сантиметров – не больше любого из отдельных огней. Если бы мы могли подняться высоко над Землей и город оказался бы в тысячах километров под нами, мощный источник света в его центре оставался бы видимым долгое время после того, как отдельные огни исчезли из виду. Если смотреть на галактику из огромной дали Вселенной, она может оказаться слишком маленькой, тусклой, едва заметной, но ее яркое ядро ослепительно сверкает. Это квазар.

Астрономы коллекционируют далекие светящиеся точки

Самое поразительное свойство квазаров – сильное красное смещение, указывающее на большое удаление и высокую светимость. Расширение Вселенной растягивает волны движущихся в ней фотонов – этот эффект называется *космологическим* красным смещением[125]. Красное смещение, обозначаемое буквой z, определяется по формуле $1 + z = R_o / R_e$, где R_o – размер Вселенной (или расстояние между любыми двумя точками пространства) на момент, когда наблюдается свет объекта, а R_e – размер Вселенной (или расстояние между любыми двумя точками пространства, поскольку все пространство расширяется одинаково) на момент, когда этот свет был излучен. Точно таким же является соотношение для излучения, $1 + z = ?_o / ?_e$, где $?_o$ – растянутая или смещенная в красную область спектра длина волны фотона, который мы сейчас наблюдаем в телескоп, а $?_e$ – длина волны этого фотона в момент его первоначального появления.

Чем дальше галактика, тем быстрее она улетает от нас, в действительности любая галактика удаляется от любой другой галактики[126]. Это наблюдение, сделанное Эдвином Хаббломом в 1929 г., привело к идее расширяющейся Вселенной. Если красное смещение невелико, оно примерно равно скорости удаления в долях скорости света[127]. До открытия квазаров самым далеким известным объектом была галактика в скоплении Гидры с красным смещением $z = 0{,}2$. Через два года Мартен Шмидт зарегистрировал новое красное смещение – квазар 3C 9[128] с $z = 2{,}0$, удаляющийся со скоростью 80 % от световой. Свет, который мы видим сейчас, был излучен, когда Вселенная была в четыре раза моложе, чем сейчас (илл. 22). Поскольку дальний свет – это древний свет, астрономы используют далекие объекты как «машины времени». Квазары – это зонды для изучения далекой и

древней Вселенной.



Илл. 22. Свет, приходящий издалека, — древний свет. Красное смещение вызывается расширением Вселенной, и Хаббл доказал, что оно возрастает по мере удаления от Млечного Пути. График показывает отношение красного смещения или относительного изменения длины волны вследствие того, что свет движется в расширяющейся Вселенной, и ретроспективного времени, или времени с момента излучения света. Возраст Вселенной составляет 13,8 млрд лет. Свет квазаров путешествует значительную часть этого времени. Сплошной линией показана принятая сейчас космологическая модель. *Крис Импи*

Поначалу поиск квазаров был трудным делом. Чтобы точно их локализовать, радиоастрономам приходилось заниматься долгой монотонной работой. Типичный день за телескопом состоял из двух 12-часовых смен, поскольку радиоволны хорошо регистрируются как днем, так и ночью. Нужно было проверить и перепроверить множество электрических соединений в аппаратной. Подключения подавали сигналы от разных телескопов или элементов решетки антенн на коррелятор, и только эксперт мог разобраться в этих хитросплетениях. Вычислительные машины только появились, сигналы записывались в аналоговой форме на магнитную ленту. Штатные сотрудники в течение всего дня должны были следить за магнитофонными деками и менять бобины, чтобы лента не закончилась. Затем данные вводили в большую ЭВМ с помощью перфокарт и видели, как меняется сила радиосигнала по мере движения источника по небу, после чего соединяли эти данные с точными измерениями времени для расчета местоположения. Для

точного вычисления только одной позиции требовались долгие дни и бесконечные замеры.

Что касается оптической астрономии, жизнь ученого была несколько проще и привлекательнее. Он управлял «стаканом» первичного фокуса большого телескопа, подвешенного над главным зеркалом, словно муха, угодившая в стальную паутину. Щель купола обсерватории выходила на усеянные звездами пространства. Астроном приносил в кабину «стакана» фотопластинки, заключенные в светонепроницаемую упаковку, и аккуратно помещал их в камеру, чтобы на них упал свет ночного неба. Затем с помощью кнопок на маленькой панели астроном тонко корректировал скорость движения телескопа, чтобы обеспечить максимальную четкость изображений. Романтика, но в то же время монотонная работа. Зимой – холод 12-часовых ночных дежурств: работа заключалась фактически в том, чтобы каждые несколько секунд нажимать кнопки управления и каждые несколько часов менять фотопластинки. Астроном мог провести у телескопа всю ночь, измеряя красное смещение одного-единственного объекта.

Было каталогизировано лишь несколько десятков квазаров, когда астрономы заметили, что эти квазары – более голубые (следовательно, более горячие), чем любая другая звезда. Нашлись исследователи, которые поняли, что имеются другие, столь же голубые квазизвездные объекты, не связанные ни с каким радиоисточником. Судя по спектрам, многие из этих голубых объектов имели сильное красное смещение; они тоже были квазарами. Воодушевленные открытием, астрономы провели фотографические исследования больших участков неба, чтобы «собрать урожай» самых голубых объектов. Метод оказался очень эффективным: найденных квазаров оказалось в десять раз больше, чем квазаров с сильным радиоизлучением.

Временами охота за квазарами приводила к личным конфликтам. В 1965 г. Алан Сэндидж из Института Карнеги написал статью о новом классе радиоспокойных квазаров, и, положившись на репутацию ученого, редактор *Astrophysical Journal* опубликовал статью без рецензирования. Это вызвало возмущение Фрица Цвикки из Калтеха – ведь ранее именно он открыл компактные галактики со свойствами квазара. Через несколько лет в предисловии к своей книге о свойствах этих удивительных галактик он желчно выразился: «Несмотря на то, что все эти факты были известны Сэндиджу в 1964 г., он пошел на одну из дичайших попыток плагиата, заявив о существовании нового важнейшего элемента Вселенной – квазизвездных галактик. Эпохальное открытие Сэндиджа заключается не более чем в

переименовании компактных галактик, которые он назвал “незваными гостями” и квазизвездными галактиками, таким образом, сам оказавшись в положении незваного гостя»[129]. Вот вам и благовоспитанные ученые!

Из-за соперничества Института Карнеги и Калтеха появились многие масштабные проекты, продвигающие оптическую астрономию XXI в. Калтех построил десятиметровые телескопы-близнецы в обсерватории Кека на Гавайях, а Карнеги – пару 6,5-метровых телескопов Магеллана в Чили. В настоящее время Институт Карнеги является ведущим партнером проекта Гигантского Магелланова телескопа, а Калтех – ведущий партнер проектируемого Тридцатиметрового телескопа[130]. Оба проекта являются международными и стоят миллиарды долларов. Поскольку астрономы охотятся за самыми отдаленными светящимися точками, их «игрушки» становятся сложнее и значительно дороже.

Аризонский университет производит зеркала для Гигантского Магелланова телескопа. Примерно раз в год я наведываюсь в помещение под футбольным стадионом, где в десятиметровую емкость помещают 20 тонн чистого стекла в виде отдельных мелких сегментов, нагревают до 1170 °C и начинают раскручивать. Огромная печь вращается во всполохах света и волнах жара, превращаясь в адскую карусель; стоящие вокруг инженеры в белых халатах и защитных очках напоминают безумных ученых. Три месяца спустя, когда зеркало полностью охладится, его полируют почти до идеальной гладкости. Что любопытно, если бы готовое зеркало можно было увеличить до размеров континентальной части США, самые значительные неровности его поверхности выступали бы менее чем на 2,5 см. В Гигантском Магеллановом телескопе семь таких зеркал: шесть из них окружают центральный элемент как лепестки цветка. Тем временем строится и Тридцатиметровый телескоп из 492 шестиугольных зеркал, по 1,5 м в поперечнике каждое[131]. Оба проекта претендуют на звание нового крупнейшего телескопа в мире. В каждом проекте значительная часть времени будет уделяться изучению квазаров.

Выдвижение гипотезы о массивных черных дырах

Еще до открытия квазаров имелись причины полагать, что в центре некоторых галактик происходит нечто необычное. В 1959 г. расчеты показали, что широкие эмиссионные линии сейфертовских галактик могут объясняться гравитацией компактного объекта, который в миллиард раз массивнее Солнца.

Английский теоретик Джеффри Бербидж лаконично сформулировал проблему радиогалактик: энергия их магнитных полей и релятивистских частиц такова, что для ее получения необходимо полностью преобразовать в энергию до 100 млн солнечных масс[132]. Релятивистскими называются частицы, движущиеся с околосветовой скоростью. Армянский теоретик Виктор Амбарцумян[133] предложил «радикально пересмотреть концепцию галактического ядра», утверждая: «Мы должны отбросить мысль, что ядра галактик состоят только из звезд»[134].

Посыпались гипотезы. Возможно, источником энергии являются вспышки в плотном ядре звезды, когда одна сверхновая запускает цепную реакцию в остальных. Возможно, звездное скопление может достичь очень высокой плотности вследствие столкновений, ведущих к выбросу большого количества газа. Возможно, энергию излучает одна сверхмассивная звезда. Через год после эпохального открытия Шмидта два теоретика предположили, что источником энергии квазара является аккреция на сверхмассивную черную дыру[135]. Они поняли, что термоядерный синтез в ядрах звезд явно недостаточен для выработки энергии квазара. Здесь нужен гравитационный двигатель. Масса, перемещающаяся по спирали на самую внутреннюю устойчивую орбиту вокруг массивной черной дыры, может быть преобразована в энергию частиц и излучения с эффективностью, близкой к 10 %. Даже при такой эффективности самые яркие квазары должны питаться черными дырами, которые в миллиарды раз массивнее Солнца.

Астрофизики не сразу приняли идею сверхмассивных черных дыр. Напомню, что в 1964 г. был предложен термин «черная дыра» и впервые зарегистрирован Лебедь X-1. Мысль о черных дырах звездной массы все еще казалась инновационной – и тут теоретики заводят речь о черных дырах в миллиарды раз более массивных! Похоже на дикую выдумку. Можете себе представить увеличение в миллиард раз? Это разница между одной крупинкой песка и полной песочницей, между бродягой, который может позволить себе бургер, и самым богатым человеком в мире, между массой ваших ближайших родственников и массой горы Эверест. Даже видавших виды астрофизиков шокировала мысль о черных дырах весом с небольшую галактику.

Предположение о гигантской энергоемкости квазаров основывается на факте их исключительной отдаленности от Земли, следовательно, чтобы быть настолько яркими, квазары должны обладать очень высокой светимостью. Светимость – это абсолютная яркость, или показатель того, сколько фотонов в секунду излучает источник света. Если бы квазары не были

удалены от нас на расстояния, о которых свидетельствует их красное смещение, то требования к их энергоемкости были бы менее жесткими. Вот как это работает. Стоваттная лампочка на расстоянии 100 м кажется тусклой, но если до лампочки 100 км, то она должна быть в миллион раз ярче, чтобы мы не увидели разницы в яркости, – то есть 100-мегаваттной. Квазары тусклые, но они удалены от нас на миллиарды световых лет и потому должны быть фантастически яркими.

Это заставило небольшую, но авторитетную группу астрономов, в том числе нескольких выдающихся ученых, подвергнуть сомнению космологическую природу красного смещения квазаров[136]. Космологическое красное смещение в модели расширяющейся Вселенной преобразуется в расстояние. Астрономы указали на места, где наблюдались квазары вблизи галактик со значительно меньшим красным смещением; их было больше, чем можно было бы объяснить случайностью. Ученые обратили внимание на преобладание специфических красных смещений, необъяснимых при космологической интерпретации. Большинству астрономов статистические выкладки показались неубедительными, но отмахнуться от аргументов, опирающихся на физический показатель плотности энергии, оказалось сложнее. Физики утверждали, что квазары должны «захлебнуться» собственным излучением и погаснуть, не успев ярко засветиться. Квазары с очень быстро меняющимся радиосигналом настолько компактны, что релятивистские электроны, излучив фотоны радиодиапазона, должны были бы сталкиваться с этими же фотонами и разгонять их до частот оптического, затем рентгеновского и гамма-излучения. В результате радиоисточник исчез бы, превратившись в гамма-источник. В середине 1960-х гг. ученые многократно и весьма бурно обсуждали эту тему на конференциях, не приходя к консенсусу. Для решения задачи потребовались новые, более совершенные радиообсерватории.

Картирование радиоджетов и лепестков

Несложно понять, почему радиоастрономы были несколько раздосадованы. Они первыми нашли свидетельство наличия огромной энергии в ядрах галактик и точно определили их местоположение, что позволило открыть квазары. Однако понять природу квазаров невозможно без измерения красного смещения, что делается в оптическом диапазоне, к тому же в основном квазары, как оказалось, генерируют довольно слабое радиоизлучение. Создалось впечатление, что теперь действие переместится в область оптической астрономии.

Однако у радиоастрономов нашелся еще один козырь. На этапе обнаружения квазаров они пользовались «тарелками», разнесенными на сотни метров, благодаря чему погрешность позиционирования не превышала одной угловой минуты. Когда же в интерферометрах они увеличили расстояние между антеннами до километра и перешли на самые короткие волны, погрешность свелась к угловой секунде, что практически соответствует точности оптического позиционирования. Радиоастрономия стала строить такие же точные карты радионеба, как и оптическая астрономия. Детально изученные, радиоисточники оказались удивительно разнообразными. Обнаружились радиогалактики, оптический компаньон которых, очевидно, тоже был галактикой, и квазары, оптический компаньон которых был похож на звезду. Чаще других наблюдались источники с огромными лепестками радиоизлучения, охватывающими эллиптическую галактику с радиоисточником в ядре, причем в некоторых случаях эти лепестки простирались в межгалактическое пространство на несколько миллионов световых лет[137]. Многие галактики имеют необычную или возмущенную форму. Создается впечатление, что из центра галактики выбрасываются пучки частиц высоких энергий, поддерживая радиосвечение парных лепестков. Красивым примером является Лебедь А[138].

Мы обнаруживали галактики с таинственными и необычными свойствами. Одни имеют мощное радиоизлучение, другие интенсивно излучают в рентгеновском диапазоне, третьи отличаются сильным оптическим излучением, а вблизи центра наблюдается быстро движущийся газ. Ни одно из этих проявлений не характерно для галактики, являющейся лишь большим скоплением звезд. Астрономы обозначают галактики с особенно интенсивными энергетическими процессами в ядре общим термином «активная галактика».

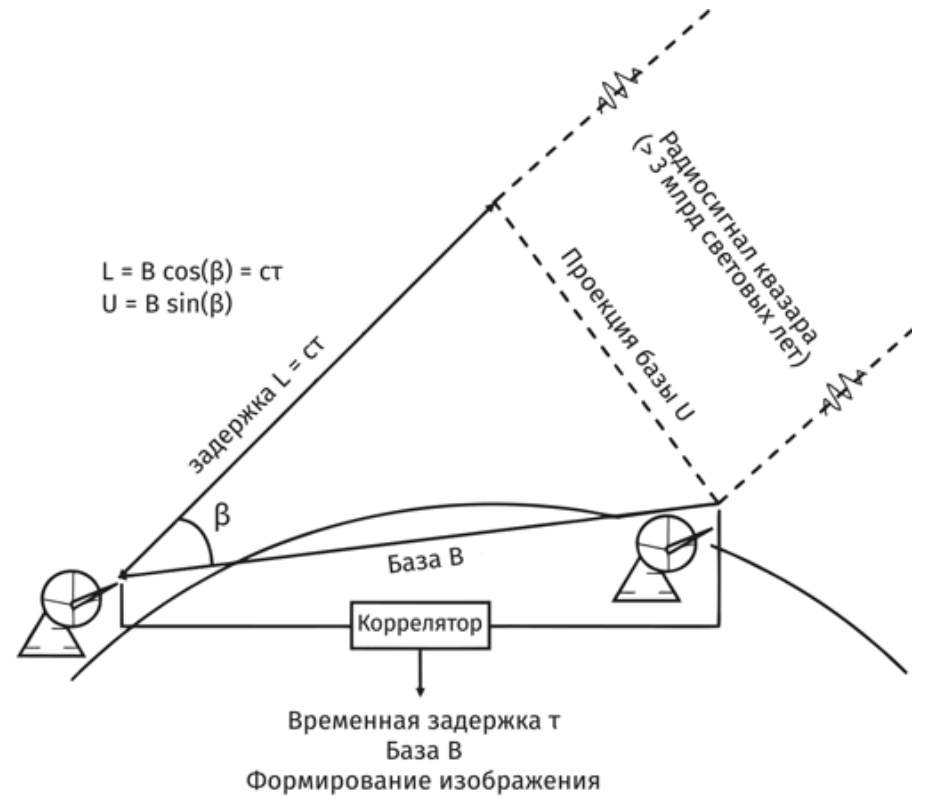
Поскольку я занимаюсь оптической астрономией, то, как правило, предпочитаю видимые данные, но для изучения активных галактик я воспользовался «Очень большой решеткой» (VLA) в Нью-Мексико: я работал в той же аппаратной, где во время съемок фильма «Контакт» Джоди Фостер получила послание от инопланетян. VLA представляет собой комплекс из 27 тарелок (каждая диаметром 25 м), которые можно конфигурировать в форме буквы Y, размещенной на плоскости в 40 км. Тарелки перемещают по железнодорожным путям, увеличивая и уменьшая расстояние между ними. Пока местные радиоастрономы охотно помогали мне с обработкой данных, я заметил, что им нравится сохранять ауру таинственности вокруг

своей работы. Я был не более чем почетным гостем в их племени.

Радиоастрономы уделяли особое внимание источникам, неразличимым для существующих интерферометров. Изменчивость источников свидетельствовала об их размерах – ненамного больше нашей Солнечной системы. В 1960-х гг. ученые задумали создать радиотелескоп размером с Землю. Нужно было найти другой способ сопоставления сигналов разных телескопов, поскольку для трансконтинентальной передачи не годились кабели и линии СВЧ-связи. Радиоастрономы решили записывать сигнал каждого телескопа на магнитную пленку с указанием времени по атомным часам и далее сводить сигналы всех пленок и получать интерференционные полосы – а затем карту. Данные кропотливо обрабатывались, что требовало таких технических средств, как атомные часы, компьютеры и магнитофоны. В 1967 г. группы американских и канадских астрономов наблюдали несколько источников при помощи антенн, находящихся на расстоянии 200 км. Через год они подключили удаленные антенны в Пуэрто-Рико, Швеции и Австралии. База увеличилась до 10 000 км, или 80 % диаметра Земли. Угловое разрешение выросло в 1000 раз, до одной тысячной доли угловой секунды – это угловой размер десятицентовой монетки на вершине Эйфелевой башни, если смотреть на него из Нью-Йорка (илл. 23). Теперь радиоастрономия располагала гораздо более четкими изображениями – по сравнению с оптической астрономией.

Новую технологию назвали интерферометрией с очень длинной базой (Very Long Baseline Interferometry, VLBI). В 1970 г. радиоастрономы, изучая квазары при помощи VLBI, заметили, что самые компактные радиоисточники создают односторонние струи, в которых часто присутствуют «пузыри» – или горячие точки. Собрав данные за год, они увидели, как эти пузыри удаляются от ядра. Астрономы привыкли иметь дело с огромной временной шкалой межгалактической Вселенной, поскольку галактика совершает один оборот за сотни миллионов лет, и были счастливы, заметив изменения, происходящие от года к году[139]. Однако, преобразовав наблюдаемое поперечное перемещение пузырей в скорость, они были потрясены: скорость разлета в 5–10 раз превышала скорость света. Это нарушение принципа относительности? Нет, всего лишь оптическая иллюзия. Поскольку джет от компактного радиоисточника направлен практически прямо на нас, а пузыри двигаются с околосветовой скоростью, создается впечатление, что они быстро движутся в поперечном направлении. Представьте, что кто-то с Земли перемещает по поверхности Луны световое пятно очень мощного прожектора. Если луч двигается быстро, наблюдателю на Луне

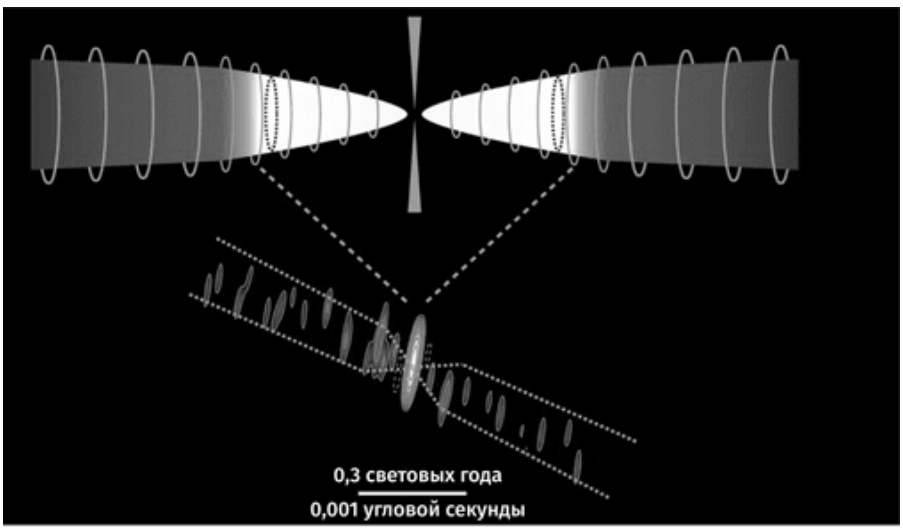
покажется, что он перемещается быстрее света, хотя фотоны луча летят со скоростью света – и ни на йоту быстрее. Этот феномен, называемый сверхсветовым движением, наблюдался у десятков компактных радиоисточников.



Илл. 23. Интерферометрия с очень большой базой, или VLBI, — это метод, в котором сигналы далеко разнесенных радиотелескопов объединяются, имитируя очень большое угловое разрешение телескопа размером с максимальное расстояние между телескопами. Свет далекого квазара поступает в два телескопа с небольшой разницей во времени, и задержка высчитывается с помощью простой геометрии. Отдельные радиосигналы сопоставляет электронный прибор, который называется коррелятором. *Крис Импи*

Ювелирно точное картирование радиоисточников показало, что радиоастрономы могут получать такие же прекрасные изображения, как и в оптической астрономии (илл. 24)[140]. Данные поддерживают гипотезу сверхмассивных черных дыр. Мощное радиоизлучение свидетельствует о работе ускорителя частиц, а компактность означает, что излучение приходит из

крохотной области пространства. На это способна только гравитационная машина – такая, как черная дыра. Кроме того, поскольку галактики имеют импульс, а компактный объект в центре галактики должен быть вращающимся, газ будет улетать от него над полюсами вдоль оси вращения. Черная дыра намного более мощный ускоритель частиц, чем любое творение рук человеческих. Гравитация питает парные джеты намагниченной плазмы, которые выбрасываются вовне из области вблизи черной дыры почти со скоростью света, протягиваясь далеко за границы галактики и освещая радионочь.



Илл. 24. Данные об активной галактике NGC1052, полученные радиоинтерферометром в миллиметровом диапазоне (внизу), и схема горизонтальных джетов с поперечным разрезом вертикального аккреционного диска (вверху). Магнитное поле помогает выравнивать и питать джеты, а данные позволяют измерить силу магнитного поля у горизонта события центральной черной дыры. *Анн-Катрин Бачко / A&A, vol. 593, p. A27, 2016, печатается с разрешения / копирайт ЕКА*

«Зоопарк» активных галактик

В притче о слепцах, ощупывавших слона в попытке узнать, как он выглядит, говорится, что один потрогал ногу и сказал, что слон похож на колонну, второй – хвост и сравнил слона с веревкой, третий ощупал ухо и сказал, что слон напоминает лист пальмы, а четвертому, ощупавшему бивень, слон показался похожим на трубу (илл. 25). Эта притча показывает, как опасно делать выводы на основании неполной информации. Давайте

посетим «зоопарк» активных галактик и узнаем, на что похожи эти создания.

Активные галактики определяются через отрицания: их поведение в энергетическом отношении невозможно объяснить составом звезд или звездными процессами. Их изучение началось со спиральных галактик, открытых Сейфертом в 1943 г. Их яркое голубое ядро и широкие эмиссионные линии указывали на газ, движущийся необъяснимо быстро для нормального паттерна вращения галактики[141]. Теперь мы понимаем, что галактики Сейферта – это «недостающее звено» между нормальными галактиками и квазарами, поскольку они имеют нетепловое излучение, но находятся ближе и являются менее яркими, чем квазары. Однако, поскольку галактики Сейферта были позабыты на несколько десятилетий, на момент открытия квазары казались беспрецедентным явлением. С помощью космического телескопа «Хаббл» астрономы сделали фотографии глубокого космоса и доказали, что «туман» вокруг квазаров в действительности является светом дальней галактики. Возвращаясь к аналогии с полетом над ночным Лос-Анджелесом, можно назвать это демонстрацией того, что квазар как источник света обитает в звездном мегаполисе[142].

Илл. 25. На этой японской гравюре XIX в. слепцы изучают слона на ощупь и приходят к совершенно разным выводам о его облике. В науке эта притча олицетворяет риски неполной информации, а в астрономии — сложность сопоставления информации, полученной из разных частей электромагнитного спектра. *Иттё Ханабуса*

Предпринималась аналогичная попытка классифицировать радиоисточники разных видов. Радиогалактики с низкой светимостью имеют ядро и парные джеты, обычно оканчивающиеся в пределах галактики лепестками излучения неправильной формы. Радиогалактики с высокой светимостью имеют ядро и одиночную струю, выбрасывающую лепесток далеко за пределы родительской галактики. Радиоисточниками с самыми мощными ядрами оказались квазары с быстро меняющейся яркостью в радио- и оптическом диапазонах и чрезвычайно высокими плотностями энергии. Подвид с самыми экстремальными характеристиками получил название «блазар». Судя по названию, он характеризуется резкими колебаниями яркости, иногда меняющейся ежеминутно. И это вполне коррелирует с ситуацией, когда мы смотрим через жерло релятивистского джета на центральную машину – сверхмассивную черную дыру[143].

Много лет назад я отправился в Россию охотиться на блазары, и результаты этой охоты превзошли ожидания. Временами моя поездка превращалась в настоящий шпионский роман. Двое крепких мужчин с пистолетами под пиджаками сели

по бокам от меня на заднее сиденье автомобиля, меня охватили дурные предчувствия. Обычно жизнь астронома из обсерватории не столь богата событиями. Мы ехали через границу на фабрику мороженого в Грузии, чтобы набрать сухого льда для охлаждения инструмента, который я привез из США.

Мы прибыли к российскому шестиметровому – самому большому в мире – телескопу, который используют для изучения самого редкого «зверя» внегалактического «зоопарка». Интенсивность света блазара менее чем за час может усилиться настолько, что в 100 раз превысит светимость целой галактики. Нашим инструментом был фотометр, способный измерить яркость далекого источника излучения менее чем за секунду. Мы надеялись получить незамутненные изображения воронки вокруг сверхмассивной черной дыры. Моим «подельником» был Сантьяго Тапиа, чилийский астроном, с которым я познакомился в Аризоне. Нас принимали сотрудники обсерватории – ведущие исследователи с ученой степенью, чья зарплата не превышала $100 в месяц (этого едва хватало на то, чтоб прокормить и одеть семью). По сравнению с ними я, молодой постдок из Америки, был богачом.

Такой была Россия на закате Советского Союза. Повсюду были признаки разрухи и упадка. На рынках в Ленинграде мы видели пустые прилавки, у ресторанов (каких было немного) выстроились длинные очереди. Нас ждало трехдневное путешествие на Кавказ – туда, где находился телескоп, по пути в наш поезд ворвались солдаты с автоматами Калашникова наперевес в поисках воровских банд. На следующий день после прибытия я по наивности отправился на прогулку над речной долиной. Тем же вечером, когда мы с хозяевами ели водянистый борщ и черствый хлеб, они попросили меня быть осторожным, сообщив, что в долинах можно встретить грузинских торговцев контрабандным оружием – их поведение непредсказуемо.

Сбор данных шел тяжело. Мы с Сантьяго по очереди катались в «стакане» первичного фокуса – в металлическом цилиндре наверху телескопа, где фокусируется свет, отражающийся от главного зеркала. В патроне находился и фотометр, который мы привезли из Соединенных Штатов. «Стакан» не был утеплен, и, несмотря на многослойную зимнюю одежду, к концу долгой февральской ночи я промерзал до костей. Однако были и радостные моменты. Одной ясной ночью объект наших наблюдений начал мерцать, и счетчик фотонов инструмента показывал, как подскакивает и спадает его яркость. Я представил себе, как разрывается на части звезда, врезавшаяся в аккреционный диск и отправляющаяся на корм чудовищу. Под

утро мы с нашими русскими хозяевами ели «икру бедняков», приготовленную из мелко нарезанных маринованных овощей. Мы допивали бутылку обжигающей водки и делились историями, пока распухший красный диск солнца поднимался над Кавказскими горами.

«Проблема слона» в случае активных галактик вызвана избирательным зрением. При использовании метода радиоволн вы увидите ядро, джеты и лепестки, но большинство активных галактик – радиоспокойные. Пользуясь оптическими методами, вы увидите широкие эмиссионные линии и яркое ядро в окружении тусклой родительской галактики, но упустите из виду феномен релятивистских джетов. Эти два фрагмента электромагнитного спектра не составят полной картины. Нам нужны другие методы наблюдения.

Как мы уже говорили, рентгеновская астрономия позволила в 1964 г. открыть эталонную черную дыру Лебедь X-1. Через шесть лет ракета зарегистрировала рентгеновское излучение двух ближних активных галактик – Центавр A и M87, а также квазара 3C 273[144]. В 1970-х гг. высокая чувствительность орбитальной обсерватории «Эйнштейн» позволила обнаружить множество квазаров. Их рентгеновское излучение было переменным, свидетельствуя, что оно исходит из областей вблизи центральной машины. Ультрафиолетовое и рентгеновское излучение многих квазаров напоминало тепловое излучение газа при температуре 100 000 кельвинов. Примечательно, что это соответствовало моделям с аккреционным диском вокруг сверхмассивной черной дыры[145].

Каждый раз, когда астрономы начинали наблюдения в новом диапазоне частот, обнаруживались активные галактики. С помощью астрономического спутника с инфракрасным телескопом, запущенного в 1977 г., удалось выяснить, что квазары активно излучают в ИК-диапазоне. Была высказана догадка, что коротковолновое излучение, возникающее возле ядра, преобразуется частицами космической пыли в инфракрасное излучение с большей длиной волны[146]. В течение 1990-х гг. принадлежащая NASA гамма-обсерватория «Комптон» открыла еще один способ наблюдения за активными галактиками – в области высоких энергий. Парные джеты, выбрасываемые из полюсов черной дыры, способны излучать огромное количество гамма-лучей. Разница между длинами волн, на которых наблюдались некоторые активные галактики, невероятно велика – 100 млн трлн (10^{20}). В 2018 г. было открыто новое великолепное окно наблюдений за активными галактиками – в момент обнаружения нейтрино, испущенного

блазаром в 4 млрд световых лет от нас. До этого регистрировались только нейтрино Солнца и относительно близкой сверхновой. Нейтрино возникло вблизи сверхмассивной черной дыры блазара и через 4 млрд лет было обнаружено детектором, установленным во льдах Антарктики[147].

«Проблему с описанием слона» может обострять «шовинизм диапазонов». Астрономы специализируются не только в предмете своего внимания, но и в методах наблюдения. Оптические астрономы, по-прежнему составляющие большинство профессионалов, следуют классической траектории развития этой области знания – от наблюдений невооруженным глазом к фотографии и ПЗС-фотометрии. В радиоастрономию часто переходят инженеры, а в инфракрасную и рентгеновскую – физики. Помимо технических различий, астрономов, работающих с разными длинами волн, разделяет принадлежность к разным «племенам». Они редко общаются, хотя это было бы совсем не лишним.

Вопрос восприятия

Астрономы пытаются унифицировать «обитателей зоопарка» активных галактик, исходя из предположения, что их облик зависит от направленности. Спиральные галактики являются уплощенными, а аккреционные диски – тонкими, следовательно, можно ожидать, что свойства активных галактик определяются ориентацией в пространстве. Простая аналогия: сфера всегда имеет округлую форму независимо от расположения, а тонкий диск может выглядеть как круг, эллипс и даже линия.

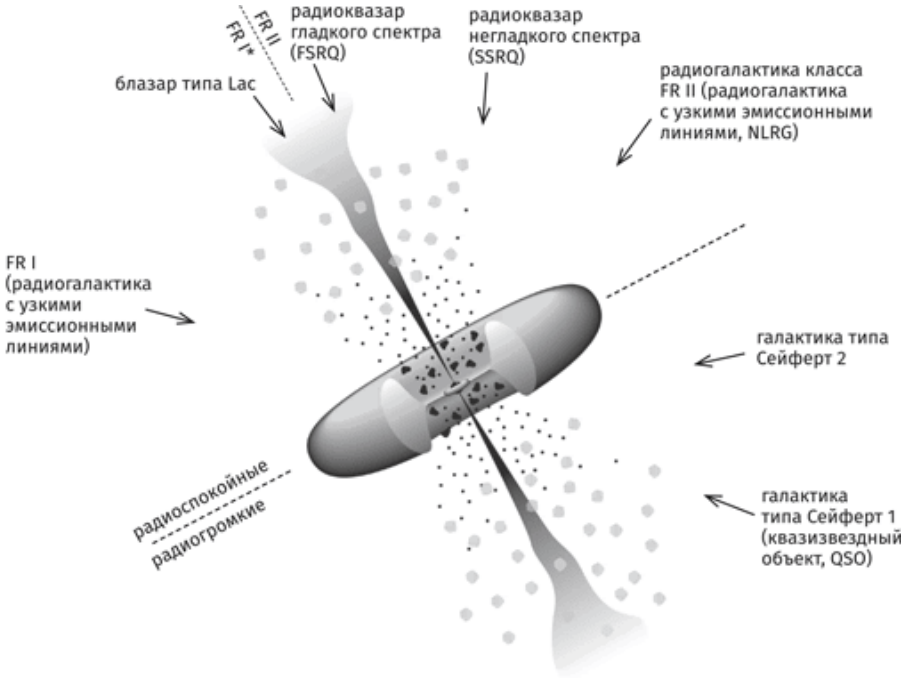
Радиоастрономы поняли, что разница в радиояркости квазаров может не иметь отношения к различиям в светимости. Если джеты, ускоряющие частицы почти до скорости света, направлены непосредственно к лучу зрения, то излучение резко усиливается. Прямой взгляд вдоль полярной оси сверхмассивной черной дыры обнаружит мощное радиоядро, односторонний джет и, возможно, слабое гало широко распространившегося излучения в радиодиапазоне. Таковы быстро меняющиеся блазары, составляющие малую долю от общего числа, поскольку это очень специфическая направленность[148]. Если мы посмотрим на тот же источник сбоку, то увидим слабое ядро, парные джеты и протяженные лепестки на той или другой стороне[149].

Блазары – тема моей докторантской диссертации, и еще десять лет после этого я занимался их исследованиями. Они притягательны, как спорткар для юноши, – быстрые, стильные и способные с равной вероятностью выбросить на обочину или

прокатить так, что захватит дух. Блазары непредсказуемы, поскольку их излучение зависит от изменчивых астрофизических характеристик среды возле сверхмассивной черной дыры. Часами я впустую торчал у телескопа, поскольку почти все интересующие меня объекты не подавали признаков жизни, а некоторые оказывались и подавно слишком тусклыми, но, когда мне везло, результаты были достойны Книги рекордов Гиннесса. За период работы мне удалось засечь активные галактики с наивысшей светимостью, самыми быстрыми изменениями, самым компактным излучением и высочайшей поляризацией. Поляризация происходит, когда колебания электромагнитного излучения лежат в одной плоскости; поляризация света дает информацию о геометрии источника света.

Однако серьезная наука требует аналитического подхода и систематических наблюдений, поэтому исследование строилось на совокупности данных, а не на самых захватывающих моментах. Я узнал, что блазары позволяют взглянуть на центральную машину с весьма интересного ракурса. Горячий газ, движущийся на скорости 99 % световой, свидетельствует о том, что блазары в сотни раз ярче активной галактики – если не смотреть на нее вдоль релятивистского джета. Теоретикам непросто было обосновать возможность ускорения газа до такой скорости, но наблюдатели вроде меня любят подбрасывать теоретикам трудные задачки. Постепенно обнаруживались гораздо более многочисленные активные галактики с не менее поразительным поведением и джетом, не направленным вдоль луча зрения. Моей целью было не утвердить уникальность и экзотичность блазаров, а найти им подходящее место в «зоопарке» активных галактик.

Различные идеи объединились в унифицированной модели активного ядра галактики (АЯГ). Ее основная гипотеза гласит: все активные галактики получают энергию от аккреции на сверхмассивную черную дыру, а наблюдаемые различия вызваны по большей части, но не полностью, их ориентацией в пространстве (илл. 26). На наблюдаемые свойства сильно влияет поглощение света пылевой средой и то, что газ в джетах движется с околосветовой скоростью. Истинные свойства ядра зависят от типа материнской галактики, вращения черной дыры и интенсивности аккреции[150]. Каким бы боком ни поворачивался слон, он остается слоном.


FR II
FR I*
радиоквазар гладкого спектра (FSRQ)
радиоквазар негладкого спектра (SSRQ)
блазар типа Lac
радиогалактика класса FR II (радиогалактика с узкими эмиссионными линиями, NLRG)
FR I (радиогалактика с узкими эмиссионными линиями)
галактика типа Сейферт 2
радиоспокойные
радиогромкие
галактика типа Сейферт 1 (квазизвездный объект, QSO)

Илл. 26. В этой унифицированной модели активного ядра галактики (АЯГ) все разнообразие обитателей «зоопарка» активных галактик представлено как вариации на основную тему. Энергия поступает от аккреции на центральную сверхмассивную черную дыру, но то, что видит наблюдатель, зависит от его ориентации по отношению к внутреннему аккреционному диску, более обширному пылевому тору и парным релятивистским джетам. Имена обитателей представленного «зоопарка» указаны по кругу. Типы АЯГ — то есть сейфертовские галактики, радиогалактики и блазары — в принципе, те же самые. Эта модель объясняет многие, но не все различия между активными галактиками. *NASA / Центр космических полетов Годдарда / Космический гамма-телескоп Ферми*

---

* По классификации Фонарева и Райли. — *Прим. пер.*

4. Гравитационные двигатели

Открытие активных галактик изменило астрономию. До этого считалось, что Вселенная состоит из звезд и газа, собранных гравитацией в галактики, которые тихо разлетаются все дальше друг от друга по мере расширения Вселенной. Однако, когда выяснилось, что ядерные области некоторых галактик выбрасывают громадную энергию во всем электромагнитном спектре, изменилось наше понимание структуры галактики. Это открытие повлекло за собой и новые вопросы. Как в центре галактики образуется и растет сверхмассивная черная дыра? Есть ли свидетельства того, что сила гравитации может создать такие ослепительные объекты, как квазары?

Первые ответы пришли откуда не ждали – из центра нашей собственной Галактики.

Напомню, что черные дыры – это гравитационные машины. Они преобразуют гравитационную потенциальную энергию в лучистую. Иными словами, черные дыры создают свет из вещества. Ускоряясь в направлении горизонта событий, материя производит высокоэнергетическое электромагнитное излучение. Эффективность этого процесса в десятки раз выше, чем у реакции термоядерного синтеза, снабжающей энергией звезды, в том числе Солнце. Эти астрономические объекты, будучи воплощением темноты, возможно, являются ярчайшими во Вселенной среди объектов сопоставимой массы.

Большая черная дыра по соседству

Зевс был распутником, он сходился как с богинями, так и земными женщинами. Его сын Геракл был рожден от смертной, но отец приложил младенца к груди своей божественной супруги Геры, пока та спала. Проснувшись, Гера пришла в ярость и вырвала сосок изо рта ребенка. Молоко расплескалось по всему небу. Поэтому мы называем неровную полосу света, олицетворяющую нашу звездную систему, Млечным Путем – или «галактикой», что на греческом означает «молоко»[151].

Более 400 лет назад Галилей навел примитивный телескоп на светящуюся дымку Млечного Пути и увидел мириады бледных звезд. Теперь мы знаем, что Млечный Путь выглядит как лоскутное одеяло из-за космической пыли, которая делает свет звезд красным и тусклым. Темные фрагменты не говорят о том, что звезды на этих участках отсутствуют – просто в этих местах они затемнены. Свет, идущий до нас из центра Галактики, с

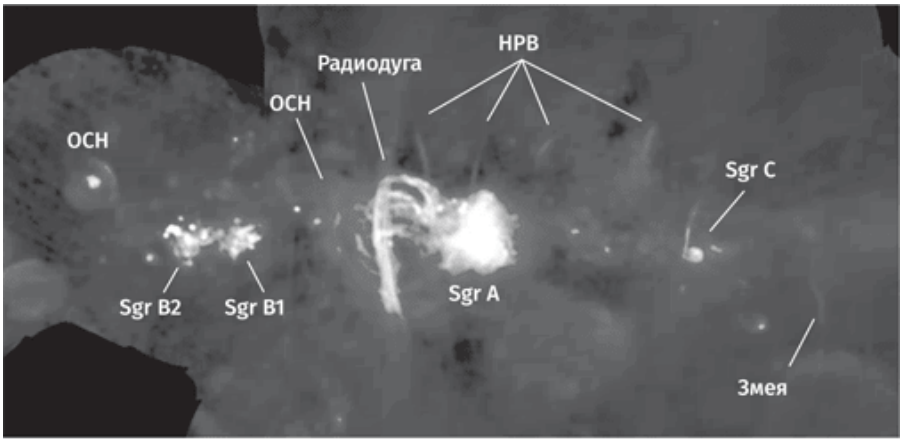
расстояния около 27 000 световых лет, почти полностью перекрыт[152]. К нам пробивается только один из триллиона фотонов. С тем же успехом мы могли бы смотреть на закрытую дверь.

Карл Янский, отец радиоастрономии, в 1933 г. доказал, что радиоизлучение Млечного Пути достигает максимума в созвездии Стрельца. Это согласуется с наблюдением Уильяма Гершеля: в Стрельце находится самый плотный участок нашего «города звезд». Пыль не действует на радиоволны. Однако простая радиоантенна Янского не могла точно определить положение источника радиосигналов. В 1974 г. Брюс Балик и Роберт Браун прибегли к методу интерферометрии с очень длинной базой и доказали, что радиоисточник в центре нашей Галактики является очень маленьким объектом[153]. Недавние наблюдения говорят о том, что это самый компактный радиоисточник в небе (илл. 27). Он не похож на другие два источника, найденные в ранних исследованиях. Стрелец А* имеет ту же радиояркость, что Дева А и Лебедь А, но Дева А (M87) – это активная эллиптическая галактика на расстоянии 54 млн световых лет, а Лебедь А – деформированная галактика в 750 млн световых лет. Центр Млечного Пути в миллионы раз менее мощный, чем эти две прототипичные радиогалактики, и, видимо, природа этого явления совсем иная.

Что за радиоисточник может быть таким слабым? В 1974 г. молодой теоретик из Кембриджского университета Мартин Рис предложил объяснение в статье о черных дырах, которая осталась незамеченной[154]. Он утверждал, что массивная черная дыра может быть темной, потому что не поглощает материю, и первым предположил, что звезды, движущиеся по ближним орбитам, подвергаются ее влиянию, – и это способ ее обнаружить.

Спустя некоторое время технологии дозрели до этой идеи. Пыль между нами и центром Галактики стала первой проблемой. Частицы пыли эффективно поглощают и рассеивают свет, но значительно слабее взаимодействуют с фотонами большей длины волны. Стоило переключиться с видимого света 0,5 мкм на волны почти инфракрасной части спектра 2 мм, как затемнение центра Галактики от триллиона раз снизилось до двадцати. Теперь мы не смотрели на закрытую дверь, а вглядывались через дымчатое стекло. Инфракрасные датчики придумали в 1970-х гг. в физических лабораториях, и в них имелся только один элемент – пиксель, поэтому, чтобы получить изображение, приходилось методично водить телескопом по сетке неба. Датчики были дорогими, капризными и ненадежными – как итальянский спорткар. К середине 1990-х гг. стали

использоваться первые мегапиксельные матрицы, и цифровая инфракрасная астрономия выросла до полноценной науки – с оптической астрономией этой случилось на 15 лет раньше[155].



Илл. 27. Центр Млечного Пути непрозрачен для видимого света, но радиоволны могут свободно распространяться по всей Галактике. Карта радиосигналов показывает зону в пределах нескольких сотен световых лет от центра Галактики; более светлые области соответствуют более сильному радиоизлучению. Некоторые явления идентифицированы как нетепловые радиоволокна (НРВ) и остатки сверхновой (ОСН). В центре зоны, обозначенной как Sgr A, находится самый компактный известный радиоисточник, открытый Карлом Янским в 1932 г. *Ф. Юсеф-Задех / Национальная радиоастрономическая обсерватория / AUI / NSF*

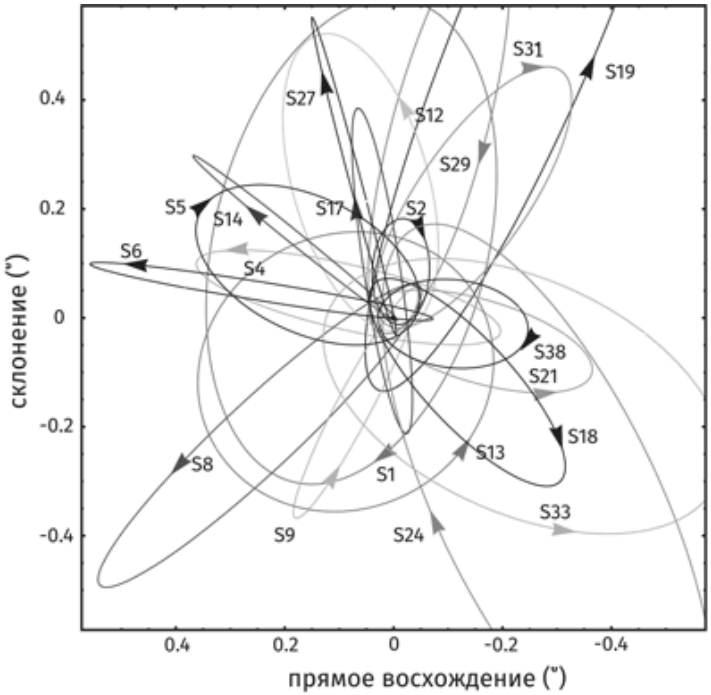
Второй проблемой оказалась высокая плотность звезд – из-за нее изображения накладывались друг на друга или сливались[156]. Представьте 10 млн звезд в пределах нескольких световых лет от центра Млечного Пути. Эта плотность в 50 млн раз выше, чем в окрестностях Солнца. Если бы мы жили там, то ночное небо представляло бы собой ослепительное зрелище. Миллионы звезд сияли бы в сотни раз ярче полной Луны; под звездным небом можно было бы читать газету. Однако, в такой обстановке практически невозможно заниматься оптической астрономией. Хуже того, под большим вопросом была бы жизнь на планетах. Взрывы сверхновых были бы обычным делом и могли происходить в непосредственной близости, то есть уничтожать все живое. Частое взаимодействие звезд нарушало бы стабильность планетных систем, и планеты выбрасывало бы в открытый космос. Помехи движению кометных облаков на периферии солнечных систем приводили бы к столкновениям и массовым вымираниям биологических видов намного чаще, чем

это происходило на Земле. Мы находимся на тихой окраине Млечного Пути – и должны быть благодарны за это.

Соединение двух технологий – массивов детекторов ИК-излучения и методов увеличения резкости астрономических изображений – позволило поставить увлекательный эксперимент. Делаем максимально четкие инфракрасные изображения центра Галактики. Находим звезды в пределах нескольких световых лет от компактного радиоисточника, движущихся настолько быстро, чтобы иметь возможность наблюдать их перемещение от года к году. Затем используем их орбиты, чтобы вычислить массу в центральной области нашей Галактики.

Первой этот эксперимент поставила исследовательская группа из Института Макса Планка возле Мюнхена. Она использовала 3,5-метровый телескоп в Чили, построенный специально для создания идеально четких снимков. Через два года группа Калифорнийского университета в Лос-Анджелесе начала такой же эксперимент с помощью только что построенного десятиметрового телескопа обсерватории Кека на Гавайях – самого большого в мире. Обеим группам пришлось решить проблему нечетких изображений, причиной чему была земная атмосфера. Если вы посмотрите на звезду в телескоп из идеального места для астрономических наблюдений, то увидите яркое светящееся ядро, хаотически пляшущее и трепещущее в окружении вспыхивающих и исчезающих пятнышек света. Эти пятнышки вызываются быстрыми изменениями плотности воздуха и температуры в верхних слоях атмосферы Земли, которая искажает свет, делая изображение размытым и рваным. При фотографировании с длинной выдержкой световые пятнышки нивелируются, и звезда выглядит ровной, но нечеткой. Короткая выдержка «замораживает» атмосферу. Ученые обрабатывают, сдвигают и накладывают эти изображения друг на друга, получая намного более четкую фотографию, но это очень кропотливый и медленный процесс. Нужно проанализировать и наложить друг на друга тысячи изображений, каждое с выдержкой в десятые доли секунды, чтобы получить единственную четкую фотографию.

После нескольких лет использования такого трудоемкого метода ученые выделили несколько десятков звезд в области их высокой концентрации и отследили их движение по эллиптическим орбитам (илл. 28). Данные по каждой звезде использовались для оценки массы, которая отвечает за групповые перемещения звезд[157].



Илл. 28. Орбиты звезд вокруг сверхмассивной черной дыры в центре Млечного Пути, измеренные за 16 лет с помощью инфракрасных изображений с использованием адаптивной оптики, обеспечивающей исключительную резкость. На расстоянии 27 000 световых лет одна угловая секунда, или ширина изображения, составляет 0,1 парсека, или 4 световых месяца. С помощью этих данных можно вычислить кеплерову орбиту каждой звезды и с высокой надежностью оценить соответствующую массу черной дыры. *С. Гиллессен / Физический институт / ApJ 692, 2009/ Институт внеземной физики общества Макса Планка, группа изучения центра Галактики, печатается с разрешения / копирайт AAS*

Обе группы исследователей пришли к одному и тому же поразительному выводу: некоторые звезды, находящиеся ближе к центру Галактики, движутся быстрее 130 км/с, а предполагаемая масса в нескольких центральных световых годах Галактики в миллионы раз больше массы Солнца. Однако ничего похожего на звездный свет в подобных количествах из этой области не исходило. Даже гипотеза о плотном скоплении тусклых звезд не смогла объяснить такую концентрацию массы в центре, учитывая порядок величины. Возможен был только один ответ: одиночный компактный темный объект в миллионы солнечных масс. Сверхмассивная черная дыра находилась в шаге от нашего дома.

Звезды на краю бездны

Как писал Роберт Фрост: «Мы танцуем по кругу и гадаем, а Тайна сидит в центре и знает». Природа ревниво охраняет свои секреты, и, чтобы пролить на них свет, нужны настойчивость и решимость. Поиск доказательств массивной черной дыры в центре Млечного Пути стал примером яростного соперничества в астрономии.

Одну сторону в этом состязании представлял Райнхард Генцель. Рыжеволосый здоровяк, краснолицый и усатый, Генцель являлся директором Института внеземной физики общества Макса Планка в немецком Гархинге, занимая одну из самых завидных должностей в астрономии. Директоров различных институтов Макса Планка назначает элитная научная организация Германии – Общество Макса Планка, и должность сохраняется пожизненно. Они получают абсолютную власть над всей иерархической системой и могут использовать ресурсы крупной организации на исследовательские цели по собственному выбору. Генцель был назначен директором всего в 34 года, его группа первой опубликовала результаты исследования центра Галактики и заявила о наличии там темного компактного объекта.

Другую сторону в гонке возглавила Андреа Гез. Уроженка Нью-Йорка итальянского происхождения, она в четырехлетнем возрасте объявила матери, что хочет стать первой женщиной на Луне. Вместо этого Андреа Гез стала астрономом, получив научные степени в Массачусетском технологическом институте (МТИ) и Калтехе. Уже в 29 лет она стала доцентом Калифорнийского университета в Лос-Анджелесе, впервые получив возможность посмотреть на центр Галактики при помощи телескопа «Кек» на Гавайях. На следующий год Андреа Гез вернулась в ту же обсерваторию и увидела, что за короткий промежуток времени звезды переместились: «Если там черная дыра, они должны были весьма существенно сдвинуться. И в тот первый год мы с легкостью могли заметить, что звезды сдвигались – это привело нас в трепет. Думаю, отказ инструмента в начале ночи только усилил наше волнение. Очень трудно получить время в обсерватории Кека – возможно, вам выделят лишь несколько ночей в год. ‹…› И вдруг все заработало – уже почти перед заходом центра Галактики. После захода мы ничего бы не увидели, но мы получили изображение»[158].

В астрономии случаются и моменты открытий, и периоды многолетнего скрупулезного сбора данных и медленного приближения к окончательному доказательству. В этом случае

обе исследовательские группы, возглавляемые соответственно ученым с неограниченными возможностями[159] и женщиной – стремительно восходящей звездой[160], знали, где и что именно нужно искать. Успех зависел от упорства и тщательности в разработке методики эксперимента.

В начале 2000-х гг. немецкая группа перешла с 3,5-метрового телескопа на 8,2-метровый «Очень большой телескоп» (Very Large Telescope, VLT), за который отвечает Европейская южная обсерватория в Чили. В середине 2000-х гг. обе группы начали использовать адаптивную оптику[161] – важнейшую инновацию, которая изменила современную астрономию: теперь ученые могли «обманывать атмосферу» и получать изображения настолько четкие, насколько позволял дифракционный предел использовавшихся ими больших телескопов. Благодаря этой технике создаваемые атмосферой размытые и искаженные изображения сразу же компенсируются гибким вторичным зеркалом. Свет мощного лазера заставляет светиться атомы в верхней атмосфере выше тех слоев, где возникают турбулентные потоки. Мельчайшие отклонения фронта световой волны измеряются со скоростью в сотни раз в секунду, а команды на корректировку передаются механическим приводам в задней части вторичного зеркала.

Адаптивная оптика позволила ученым применить законы Кеплера к звездам, наблюдаемым в центре Галактики, – движущимся словно рой разъяренных пчел. За одной звездой следили на протяжении всей ее 16-летней орбиты[162]. Астрономы также наблюдали процесс разрыва звезды или газового облака на части при попадании в зону сильной гравитации[163]. Вероятно, вещество, поглощенное черной дырой, вызвало серию рентгеновских вспышек в 2014 г. Пользуясь законами Кеплера, ученые вывели массу объекта, вызывающего движение этих звезд. Американская и немецкая группы боролись за почетный приз. Тем временем радиоастрономы доказали, что радиоисточник не превышает предполагаемого размера горизонта событий[164]. Расчетная масса оказалась в 4,02 млн раз больше массы Солнца с погрешностью всего 4 %[165]. Поскольку такие расчеты теперь возможны, у ученых больше нет необходимости в употреблении слов «кандидат» и «гипотетический» при работе над научными статьями. Существование сверхмассивной черной дыры получило неопровержимое доказательство.

Темное ядро в каждой галактике

Квазары встречаются чрезвычайно редко – в миллион раз

реже нормальных галактик[166]. В среднем, чтобы найти один квазар, приходится обследовать область пространства со стороной в миллиард световых лет. После открытия активных галактик астрономы заинтересовались, проходит ли активную фазу каждая галактика? Блестящий молодой теоретик из Англии высказал важную догадку.

Дональд Линден-Белл имел самые разносторонние интересы. Прежде чем обратить внимание на квазары, он занимался гидродинамикой, эллиптическими орбитами звезд в галактиках, отрицательной теплоемкостью и гравитационным эффектом бурной релаксации. В пророческой статье 1969 г. Линден-Белл пришел к следующему умозаключению: квазары имеют активные периоды и редко бывают очень яркими. По его оценкам, широко распространены мертвые квазары и ближайший может быть менее чем в 10 млн световых лет от нас (всего в четыре раза больше расстояния до галактики Андромеды). Он утверждал, что темные центральные массы должны собирать вокруг себя многочисленные звезды, по влиянию на которые их можно обнаружить[167].

Мне было 12 лет, когда Линден-Белл написал эту статью, и я прочел ее намного позже, но в тот момент она повлияла на мою жизнь. Мы с отцом отправились на машине по южной Англии: навестили родственников в Гастингсе, посидели на галечном пляже в Брайтоне, а затем направились через Саут-Даунс в замок Херстмонсо. Практически идеальный замок – средневековое сооружение из красного кирпича, окруженное рвом, – но в том возрасте я уже не интересовался замками. В поисках других развлечений отец заметил указатель на Гринвичскую обсерваторию, занимавшую часть замка. Через полчаса начиналась лекция.

Дональд Линден-Белл расхаживал туда-сюда за кафедрой, погруженный глубоко в свои мысли. Мы заняли места и скоро поняли, что материал нам не по зубам. Акцентируя на чем-то свое особое внимание, Линден-Белл энергично жестикулировал, бросался к доске и рисовал бесконечные и загадочные уравнения. Он рассказывал о галактиках и черных дырах. Понять лекцию можно было лишь в самых общих чертах.

Я не представлял, чем буду заниматься в жизни, и подумывал о карьере фермера, архитектора или летчика, но теоретик в твидовом пиджаке чем-то меня зацепил. Он рассказал, что в космосе – великое множество галактик, которые необходимо исследовать. Что в этих галактиках находятся темные объекты, которые можно понять с помощью красивой математики. Он был восхищен тем, что Вселенная – постижима, и его восхищение

передавалось всем вокруг. Первое зерно упало на почву моей души.

Линден-Белл предполагал, что все массивные галактики имеют в ядре сверхмассивную черную дыру и что квазары редки, потому что лишь малую часть своей жизни активно поглощают газ. Мы видим только ничтожную долю «работающих» квазаров. Большинство погрузилось в спячку, поскольку рядом не осталось пищи, и их пульс и жизненные показатели опустились до очень низких уровней.

Как найти нечто компактное, массивное и темное в центре галактики? Это зависит от того, насколько возможно выделить центральную область, где гравитацией управляет черная дыра, – сферу ее гравитационного влияния. В пределах радиуса этой сферы за перемещение звезд и газа отвечает черная дыра. Вне этого радиуса движение задается главным образом звездами вблизи центра галактики; влияние черной дыры не столь существенно. В большой галактике с внушительной черной дырой в 100 млн солнечных масс это расстояние составляет около 10 парсек, или 33 световых года[168]. Это чрезвычайно близко к центру галактики диаметром 100 000 световых лет: если бы галактика была величиной с суповую тарелку, область влияния черной дыры имела бы размер пылинки. В далекой галактике очень трудно наблюдать движение звезды или газа ввиду крошечного масштаба[169].

Мы вычислили, что черная дыра в центре нашей Галактики находится всего в 27 000 световых лет от нас, в 100 раз ближе центра ближайшей большой галактики – Андромеды. Астрономы могут выбирать звезды в интервале, который в тысячу раз меньше сферы гравитационного влияния, что дает достоверные сведения о массе черной дыры. Таков «золотой стандарт» обнаружения массивной черной дыры – однозначного подтверждения ее существования. Однако ученые также очень хотели найти спящие черные дыры и в других галактиках. Они возложили свои надежды на космический телескоп «Хаббл».

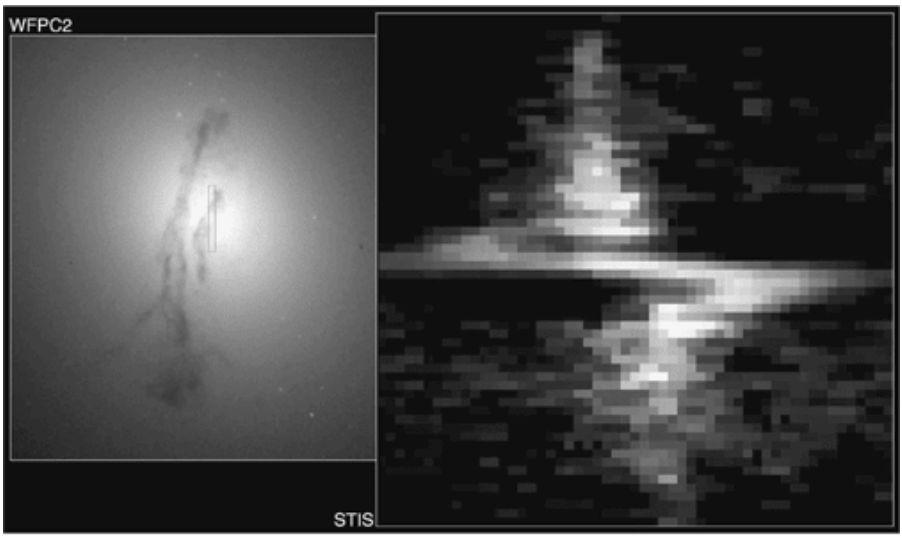
В 1990 г., когда телескоп был выведен на орбиту, всех постигло горькое разочарование. «Хаббл» был создан, чтобы получать сверхчеткие изображения с орбиты Земли, в 10 раз более резкие, чем у лучших наземных телескопов. Но первое изображение, полученное с телескопа «Хаббл», повергло официальные лица NASA в оторопь, а затем в жгучий стыд. При итоговых испытаниях в лаборатории была допущена ошибка, из-за чего главное зеркало имело сферическую аберрацию, и изображения получались искаженными. СМИ неверно поняли суть проблемы и заявили, будто для «Хаббл» использовалось дешевое

некачественное зеркало. В действительности же это было безупречно изготовленное зеркало, отшлифованное до идеально неправильной формы из-за неверного расположения калибровочной линзы во время лабораторного тестирования. На исправление ошибки ушло три года, был отправлен шаттл с очень рискованной миссией: астронавты должны были работать 35 часов в открытом космосе, чтобы решить эту проблему[170]. Когда телескоп был полностью отлажен, он начал делать идеально четкие изображения ядер галактик с расстояния в десятки миллионов световых лет[171].

Для поиска черных дыр в ближних галактиках телескоп ориентируют так, чтобы ядро галактики находилось в пределах узкой щели спектрографа. Можно получать спектры при разных положениях ядра вдоль щели, соответствующие разным расстояниям от центра галактики. Ширина спектральных линий определяется средней скоростью движения вещества. В спиральных галактиках по эмиссионным линиям измеряется скорость газа. В эллиптических галактиках по линиям поглощения измеряется скорость звезд[172]. Красноречивое свидетельство наличия черной дыры – резкое увеличение разброса скоростей газа или звезды непосредственно у центра галактики (илл. 29). Ближайшей крупной концентрацией галактик является скопление Девы в 60 млн световых лет. Для галактики этого скопления угловой размер сферы гравитационного влияния составляет 0,14 угловой секунды. Это всего в два раза больше углового разрешения спектрографа телескопа «Хаббл», поэтому поиск черных дыр на таких расстояниях велся на пределе его возможностей.

Десятилетие медленной и трудной работы увенчалось успехом: в ближних галактиках было зарегистрировано около двух десятков черных дыр[173]. Наша ближайшая соседка, галактика Андромеды (M31), имеет черную дыру в 100 млн солнечных масс, окруженную скоплением молодых голубых звезд. Мы пока не вполне понимаем, как они формируются и выживают в экстремальных условиях[174], хотя это, возможно, общее явление для спиральных галактик. Карликовый компаньон галактики Андромеды M32 также имеет черную дыру – чуть менее массивную, чем в центре Млечного Пути, в 3,4 млн масс Солнца, в пределах области пространства менее одного светового года[175]. На другом полюсе шкалы размеров – радиоисточник Дева А, о котором теперь известно, что это гигантская эллиптическая галактика M87. Черная дыра в центре M87 – настоящее чудовище, в 6,4 млрд раз массивнее Солнца[176]. Ее горизонт событий больше Солнечной системы! Черные дыры в

локальной вселенной сильно различаются размерами, имея разброс масс в 2000 раз.



Илл. 29. M84 находится в скоплении галактик в Деве на расстоянии 50 млн световых лет. Изображение слева показывает центральную область галактики, пересеченную линиями пыли. Прямоугольник отмечает расположение щели спектрографа космического телескопа «Хаббл» в момент получения данных, представленных справа. Зигзаг показывает скорости движения газа, измеренные вдоль щели: бо́льшие горизонтальные смещения соответствуют бо́льшим скоростям. Если бы в M84 не было черной дыры, возле центра галактики не наблюдались бы очень высокие скорости. *Г. Боуэр, Р. Грин / Национальная оптическая астрономическая обсерватория / NASA*

Через 40 лет после написания своей провидческой статьи Линден-Белл поднялся на сцену в Осло, чтобы получить первую премию Кавли. Рядом с ним стоял не менее выдающийся ученый – Мартен Шмидт, первооткрыватель квазаров. Догадка Линден-Белла о черных дырах идеально дополнила открытие Шмидта: в сердце каждой галактики таится тьма.

Рис, барон из Ладлоу, укрощает чудовище

Всего за десять лет черные дыры превратились из теоретической концепции для посвященных в центральный элемент эволюции массивных звезд – после объяснения активности в ядрах галактик. В те времена Кембриджский университет был самым подходящим местом для теоретика. Там

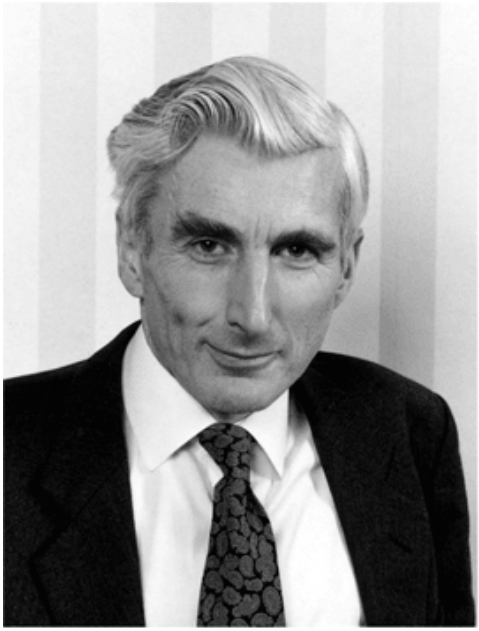
Дональд Линден-Белл в 1961 г. получил степень доктора философии и написал свою основополагающую статью в 1969-м, а Стивен Хокинг стал доктором философии в 1966 г. и написал статью об излучении черных дыр в 1974-м. Мартин Рис получил докторскую степень через год после Хокинга и написал свою классическую статью о сверхмассивных черных дырах в 1974 г.

Именно Мартин Рис – тогда еще не имея титула лорда – подвел прочный теоретический фундамент под утверждение о роли сверхмассивных черных дыр как гравитационных машин. Для любого изучающего космологию Рис – это титан. Его награды неисчислимы: премия Темплтона, медаль Дирака, премия Ньютона, медаль Кэтрин Брюс, премия Декарта, японский орден Восходящего солнца, британский Орден заслуг. Он являлся президентом Королевского научного общества, магистром кембриджского Тринити-колледжа, директором Астрономического института, профессором почетной кафедры астрономии и экспериментальной философии Томаса Плума в Кембриджском университете и Королевским астрономом Великобритании (неизменно скромный в отношении своих профессиональных достижений, Рис назвал свои должностные обязанности на этом посту «настолько необременительными, что их можно было бы исполнять посмертно»).

Поэтому перед нашим знакомством я приготовился к чему-то грандиозному. В реальности же это был коротышка с орлиным носом и пронзительными серыми глазами, с такой негромкой речью, что приходится наклоняться, чтобы его расслышать, с характерными ритмичными модуляциями уроженца Шропшира (илл. 30). Рис доказал, что аккреция на вращающуюся черную дыру может вызывать парные релятивистские джеты и нетепловое излучение во всем электромагнитном спектре, от метровых радиоволн до гамма-лучей с длиной волны меньше размера протона[177].

Активные галактики – многоплановые феномены, для понимания которых нужен целый арсенал наблюдений на разных длинах волны и методов изучения. Они представляют живой интерес для теоретиков, но трудны для наблюдения. Размытые лепестки радиоизлучения могут простираться на миллионы световых лет от галактики. Подпитка центральной массивной черной дыры зависит от ближайшего окружения и содержания газа в родительской галактике. Есть центральная область звездообразования и пылевой тор – в масштабе нескольких сотен световых лет. В центре тора, в пределах от световых недель до световых месяцев, плотные облака быстро движущегося газа генерируют широкие эмиссионные линии. Еще ближе к центру, в

масштабе размеров Солнечной системы, интенсивное ультрафиолетовое и рентгеновское излучение производит горячий аккреционный диск. Это излучение распределено по всему диапазону длин волн в виде непрерывного спектра. Наконец, в центре космической матрешки находится сверхмассивная черная дыра[178].

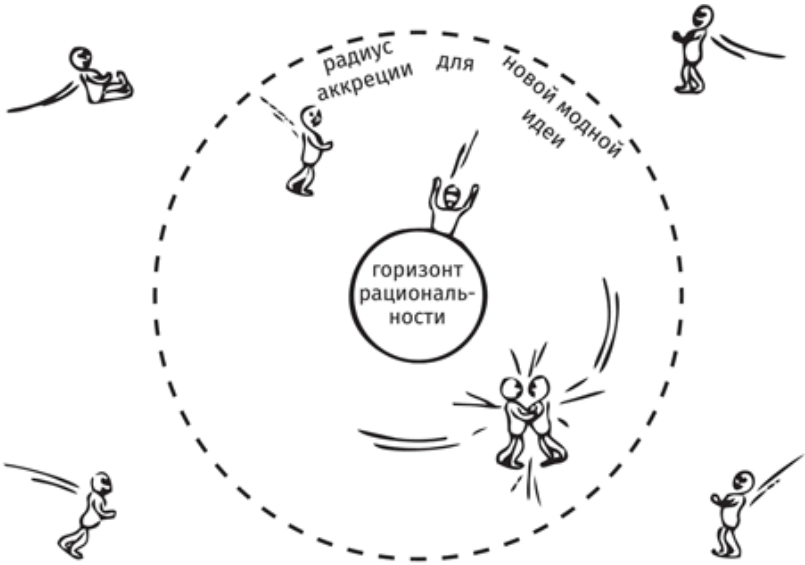


Илл. 30. Мартин Рис больше 40 лет является одним из выдающихся теоретиков в мире. Он одним из первых понял, как черные дыры — гравитационные машины — вырабатывают огромную энергию и выбрасывают релятивистские джеты плазмы. Рис — член ученого совета кембриджского Тринити-колледжа и почетный профессор космологии и астрофизики. Он является Королевским астрономом и президентом Королевского научного общества. В 2005 г. стал членом палаты лордов. *М. Рис / Кембриджский университет*

В частности, именно стараниями Риса аккреция на черную дыру стала парадигмой функционирования активных галактик, которую редко подвергали сомнениям. На конференции 1977 г. астрофизик Ричард Маккрей высмеял склонность астрономов (и ученых вообще) подпадать под влияние популярных идей. Он продемонстрировал диаграмму со схематичными фигурками и границами, отмеченными пунктирными линиями: одна обозначала сферу гравитационного влияния, другая – горизонт событий черной дыры (илл. 31). Вот его собственное описание рисунка и соответствующего социологического явления: «Система характеризуется двумя радиусами. Вне радиуса аккреции астрофизики занимаются другими проблемами и не испытывают существенного влияния этой модной идеи. Те же, кто находится внутри радиуса, тонут в этой идее с головой. Коммуникация между индивидами слаба, поскольку они находятся на случайных баллистических траекториях, в зависимости от начальных условий. В стремлении стать первыми они почти всегда промахиваются мимо центральной точки и отлетают по той или

иной касательной. При достаточном количестве астрофизиков, сплотившихся вокруг идеи, должна происходить коммуникация, но обычно это выливается в жесткие столкновения. ‹…› Единственный долгосрочный эффект – это то, что некоторые индивиды могут пересечь горизонт рациональности, за которым модная идея становится символом веры. Эти несчастные уже не смогут вернуться назад»[179]. Презентация Маккрея была шуткой. Он находил аргументы в пользу черной дыры убедительными, но напоминал коллегам о необходимости сохранять здоровый скептицизм.

Напомню, что к середине 1980-х гг. только в Млечном Пути было найдено убедительное доказательство существования массивной черной дыры. В одну из своих статей Рис включил схему, показывающую, как газ из межгалактической среды просачивается в галактику и медленно прокладывает себе путь к области ядра. Этот газ, а также газ, выброшенный эволюционировавшими звездами, способствует формированию центрального звездного скопления – плотной группы многих тысяч звезд, собранных вместе гравитацией. Звездное скопление не может выдержать гравитации такого множества звезд и коллапсирует в черную дыру, которая растет, поглощая газ и звезды. Хотя это была только схема, Рис представил убедительные физические доказательства каждого шага. В результате формирование черной дыры представляется неизбежным. В этом – талант величайших ученых: излагать сложные аргументы так, что они кажутся очевидными.



Илл. 31. Сатирическое изображение реакции астрофизиков на модную идею — например, идею черной дыры. Одни пролетают мимо, избежав ловушки. Другие сталкиваются, выделяя тепло, но почти не излучая света. Большинство попадает в ловушку влияния идеи, а некоторые просачиваются сквозь «горизонт рациональности», где утрачивают здоровый скептицизм. *Р. Маккрей / Университет Колорадо*

Как изучать Вселенную с помощью квазаров

Пока что мы пытались заглянуть внутрь массивной черной дыры и понять ее через изучение влияния на окружение. Но оказалось, что с помощью черных дыр можно исследовать еще более крупный темный компонент Вселенной. Метод использует квазары как мощные источники света, видимые с огромных космических расстояний.

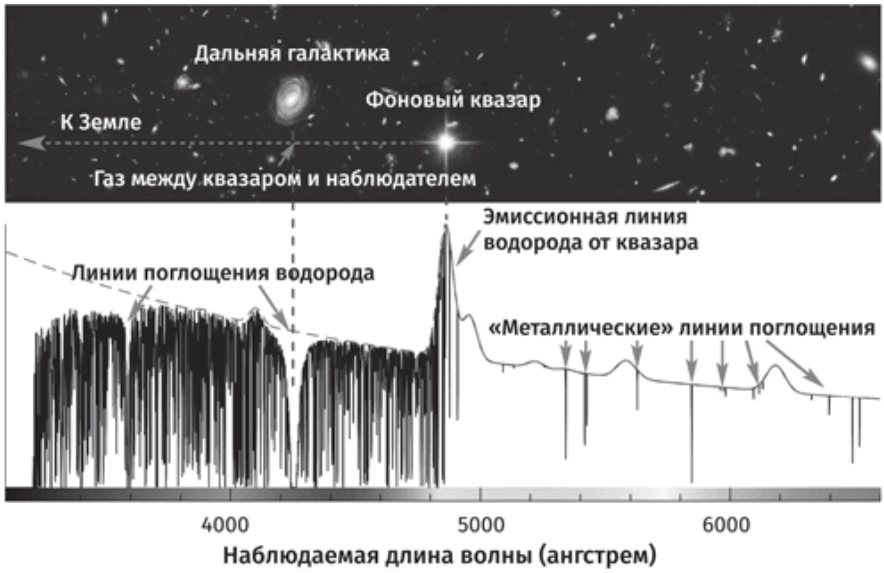
Когда открыли квазары, их красное смещение говорило о том, что они находятся очень далеко. Через два года после открытия было зарегистрировано рекордное красное смещение $z = 2$, означающее, что свет идет 10 млрд лет – 75 % возраста Вселенной. На момент открытия квазаров всего лишь $z = 0{,}4$ считался рекордом красного смещения нормальной галактики, что соответствует распространению света в течение 33 % времени существования Вселенной. Использование сверхмассивных черных дыр как далеких прожекторов положило начало новому направлению в астрономии.

Представьте очень длинный черный ящик, темный внутри, но

с открытыми торцами. Если посветить в ящик узкими лучами света и попробовать увидеть их с другой стороны, можно понять, есть ли что-нибудь внутри. Препятствие полностью перекроет путь свету, а туманная среда – например, газ – сделает свет тусклым. Когда астрономы с помощью спектроскопии детально проанализировали свет квазаров на разных длинах волн, то увидели, что равномерно распределенный свет испещрен «выемками» с отсутствующим или поглощенным светом. Важность этого поглощения впервые осознали 200 лет назад, когда Йозеф Фраунгофер построил карту темных узких линий в спектре Солнца, а Густав Кирхгоф доказал, что эти линии порождаются химическими элементами в относительно холодной солнечной атмосфере.

В спектрах квазаров встречаются линии поглощения двух типов[180]. Линии поглощения – это узкие темные области спектра, возникающие из-за того, что излучение данных частот было поглощено объектами в пространстве, которое преодолел свет. Есть линии, порожденные элементами, образующимися в звездах, например неоном, углеродом, магнием и кремнием. И есть скопище линий поглощения водорода на коротких волнах. После долгого изучения стало ясно, что первый тип линий связан с химически обогащенным газом в галактическом гало на луче зрения в направлении на квазар. Линии водорода обязаны своим происхождением первичному водороду в огромном космическом пространстве между галактиками (илл. 32)[181].

Абсорбционная спектроскопия чувствительна даже к крохотным количествам газа и позволяет зарегистрировать тусклые или темные газовые облака всего в 10–100 солнечных масс на расстоянии в миллиарды световых лет. Модель расширяющейся Вселенной определяет соотношение между красным смещением и удаленностью, поэтому спектр, то есть карту длин волн, легко превратить в карту красного смещения или расстояния. Как в нашей недавней аналогии, длинный черный ящик – это путь через Вселенную, квазары – маяки в его дальнем конце, астрономы получают спектры маяков, чтобы узнать, какое вещество находится в промежуточном пространстве. Это своего рода пробы, взятые из ядра Вселенной, указывающие на «слои» вещества по космическим, а не геологическим эпохам. Были обнаружены квазары с большим красным смещением – $z = 7$, и эти образцы могут охватывать 95 % возраста Вселенной. Спектры поглощения квазаров позволили доказать, что в межгалактическом пространстве содержится в восемь раз больше вещества, чем во всех звездах всех галактик Вселенной[182].



Илл. 32. Квазары находятся очень далеко и, как прожекторы, освещают находящееся в пространстве вещество, которое может быть темным и трудным для обнаружения иными способами. Вверху: свет квазара проходит сквозь большую галактику и ее гало, а также многочисленные малые облака водорода в межгалактическом пространстве. Внизу: спектр квазара — это схема интенсивности излучения по длинам волн. Большая галактика дает линии поглощения тяжелых элементов в красной части спектра, а маленькие облака водорода — «лес» узких линий поглощения в голубой части спектра. *М. Мерфи / Университет Суинберна*

Квазары также используются и как зонды для исследования Вселенной. Вернемся к свету, проходящему через «длинный черный ящик» Вселенной. Пространство по большей части пусто, но есть маленький шанс, что свет далекого квазара пройдет напрямую через галактику или скопление галактик. Согласно общей теории относительности Эйнштейна, свет будет отклонен массой встречного тела. При идеальных условиях точечный источник света, квазар, превращается в круг света – так называемое эйнштейновское кольцо. При небольшом отклонении точечный источник выглядит как двойное изображение[183]. Вероятность этого всего 1 %, поэтому, пока не были открыты сотни квазаров, это явление не наблюдалось. Поскольку линзирование работает как для темной, так и видимой материи, оно послужило доказательством того, что темная материя – обязательный компонент галактик, и ее в шесть раз больше по массе, чем обычной материи.

Квазары являются великолепным инструментом изучения

Вселенной, – и это неожиданный бонус. Во Вселенной – десять тысяч миллиардов звезд в нескольких сотнях миллиардов галактик. Однако квазары говорят о том, что значительно большая масса находится в пространстве между галактиками, а еще больше массы является темной и ее невозможно обнаружить никакими другими способами. Все звезды и галактики составляют лишь 2 % вещества Вселенной!

Черные дыры: счет на тысячи

Давайте вернемся к истории открытия квазаров. Чтобы обнаружить и понять квазары, нужна спектроскопия. Оптический спектр используется для измерения красного смещения, с помощью которого можно рассчитать светимость. По высококачественному спектру измеряется масса черной дыры. Однако процесс шел медленно. Большие телескопы могли получать спектр лишь одного кандидата за раз. На протяжении 1960-х и 1970-х гг. постепенно число известных квазаров выросло – от нескольких десятков до нескольких сотен.

Первый прорыв был совершен благодаря телескопам со специальной оптикой, позволяющей делать изображения больших сегментов неба. Строительство телескопа Шмидта с широким полем в Паломарской обсерватории было завершено в 1948 г., и в течение 1950-х гг. он использовался для исследования всего неба Северного полушария в двух цветах. Было получено почти 2000 фотографических пластинок. Каждая пластинка охватывает 36 квадратных градусов – это примерно размер сжатого кулака с расстояния вытянутой руки. Исследование финансировало Национальное географическое общество в рамках дополнительной космической программы, входящей в работы по картированию мира. Близнец паломарского «Шмидта» был построен в Австралии, с его помощью южное небо исследовали на протяжении 1970-х гг. Каждое изображение включало миллион галактик и 10 000 квазаров и активных галактик.

Для поисков 1 % галактик с активностью в ядре требуется дополнительная информация. Инженеры-оптики сконструировали большую призму, которую поместили на оптическом пути телескопа Шмидта. Через нее каждый слабый источник света размазывался в крохотный спектр на фотопластинке. Квазары имеют четкие и широкие эмиссионные линии; и ученые надеялись, что они будут различимыми, поскольку эмиссионная линия будет выглядеть как капля поверх полосы (илл. 33). Чтобы находить квазары на глаз, требовался огромный опыт, но были созданы приборы, способные сканировать и оцифровывать

пластинки и искать квазары с помощью алгоритмов, отличающих их от более многочисленных звезд и галактик.

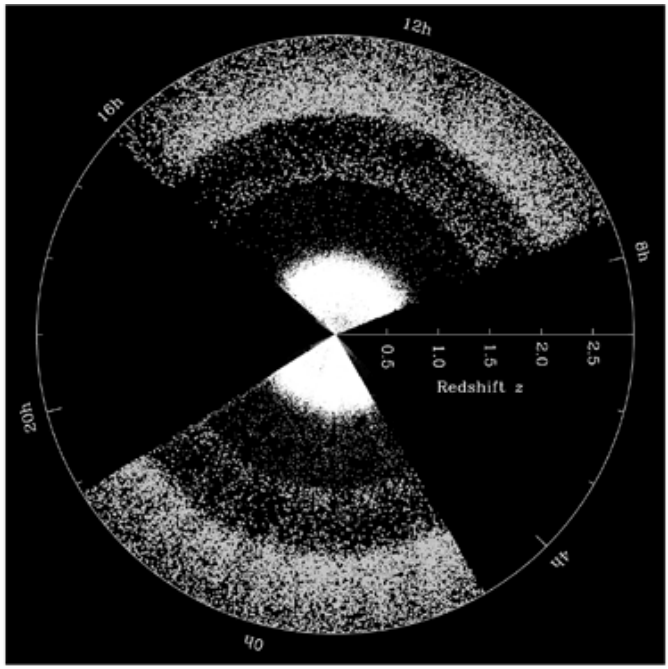
В охоте на квазары я применял именно этот метод. Дело было в Кунабарабране, в горах Варрамбангл австралийского штата Новый Южный Уэльс. Этот сонный городок на краю Аутбэка служит базой для британского телескопа Шмидта – близнеца «Шмидта» из Паломарской обсерватории, расположенного в Южном полушарии[184]. Меня отправили туда как магистранта Эдинбургского университета для участия в исследовании с использованием фотографической призмы. Попасть из мрачной шотландской зимы в жаркое австралийское лето было весьма приятно. Несколько дней после прибытия я тренировался в фотолаборатории, затем ночами вел наблюдения и проявлял фотопластинки, после чего отправлялся спать. Длина фотопластинки была 35 см, толщина – миллиметр, и управляться с ними в темноте было очень сложно. Это давняя история, но до сих пор я с болью вспоминаю, как перебил дюжину таких пластинок и потерял результаты многих часов работы телескопа. Иногда боль была реальной – края пластинок были остры, как бритва, и моя кровь капала в проявитель или фиксаж.

Илл. 33. Можно одновременно получить многочисленные спектры, если поместить большую призму на оптическом пути телескопа: в результате создается прямое изображение каждого объекта (точки) и спектр справа от него (горизонтальные полосы). При столь малом разрешении большинство объектов в поле зрения — это звезды и галактики с гладким и безликим спектром, но выделяются редкие квазары, поскольку имеют сильные широкие эмиссионные линии, которые выглядят как капли на полосках спектров. Квазар 3C 273 находится возле центра этой фотографии. *Дэвид Хауорт*

При ясном небе и правильной выдержке фотопластинок результат стоил затраченных усилий. Каждая пластинка представляла собой негатив с бледно-серым фоном и тысячами маленьких темных черточек, представлявших собой спектры. Я спал до ланча, а во второй половине дня помещал пластинки на просмотровый стол и изучал их под микроскопом. Я охотился за ускользающей черточкой с каплей на голубом конце, похожей на головастика. Капля являлась линией излучения водорода, которая отличает квазар от горячей звезды. Я помню свой восторг после обнаружения первого квазара, и это ощущение не утратилось после того, как я нашел еще несколько десятков – хотя после долгих часов вглядывания в микроскоп у меня все плыло перед глазами. Каждый из этих маленьких головастиков был массивной черной дырой на расстоянии в миллиарды световых лет, извергающей потоки излучения во Вселенную. Отловив сотый квазар, я отметил это походом в горы, где мне пришлось

продираться через дикие заросли. За ужином местные астрономы потешались надо мной как могли, напомнив мне, что в Австралии обитают три из пяти самых смертоносных пауков и четыре из пяти самых ядовитых змей в мире.

Второй прорыв произошел в 1990-х гг., когда фотопластинки заменили крупноформатными электронными детекторами, или ПЗС[185]. Через волокна и щели свет сотен объектов собирается и проектируется на ПЗС. Теперь у больших телескопов есть спектрографы, охватывающие один квадратный градус и более – что в несколько раз больше площади полной Луны. Исключительным инструментом охоты на квазары является 2,5-метровый телескоп, через который осуществляется Слоуновский цифровой небесный обзор. Телескоп не входит в 50 крупнейших телескопов мира (как, впрочем, и космический телескоп «Хаббл»), но превосходный спектрограф и ПЗС обеспечивают ему исключительную мощь. С его помощью измерили красное смещение 2 млн галактик и 500 000 квазаров (илл. 34). Что принципиально важно, эти цифровые спектры намного качественнее маленьких черточек, по которым я находил квазары в 1970-е гг. Спектры Слоуновского обзора имеют такое высокое качество, что по ним можно измерять массу черной дыры.



Илл. 34. Слоуновский цифровой небесный обзор использует 2,5-метровый телескоп в Нью-Мексико и эффективный многоэлементный спектрограф для измерения красного смещения огромного числа галактик и квазаров. Проект BOSS (Спектроскопический обзор барионных осцилляций) охватил 500 000 галактик и 100 000 квазаров, малая часть которых представлена на этой секторной диаграмме неба. Красное смещение, или расстояние, увеличивается в радиальном направлении. Галактики — это точки с красным смещением менее единицы, квазары — точки с красным смещением от 1,5 до 3. *М. Блантон / Слоуновский цифровой небесный обзор*

Мы видели, как трудно «взвесить» сверхмассивную черную дыру. Вес ближайшей из них, находящейся в центре нашей Галактики, был точно определен с помощью одиночных звезд, движущихся вокруг нее по эллиптическим орбитам. Второе точное измерение массы черной дыры было осуществлено в 1995 г., когда радиоастрономы открыли водяные мазеры – длинноволновые аналоги лазеров, возникающие, когда в газе (в данном случае молекулы воды) естественным образом складываются условия для мощного излучения. Именно это происходит в тонком диске, обращающемся вокруг центра соседней активной галактики NGC4258. В других галактиках также наблюдается мазерное излучение молекул воды в плотных центральных областях, и образующиеся спектральные линии позволяют очень точно измерить скорости мазеров

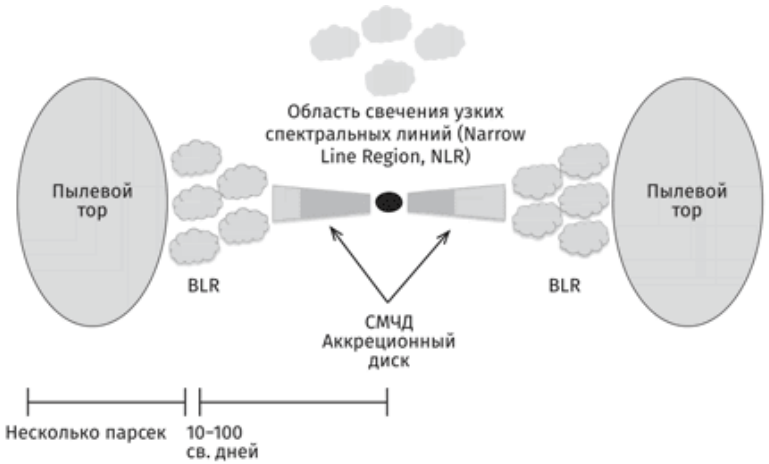
радиоволновыми методами[186]. В NGC4258 местонахождение и скорости мазеров соответствуют законам движения Кеплера и позволяют оценить центральную массу в 39 млн солнечных масс с погрешностью всего 0,3 %. Мазерное излучение наблюдается на расстояниях не более одного светового года от центра галактики, что в 1000 раз меньше радиуса сферы гравитационного влияния. Это означает, что столь большая масса сконцентрирована в области, которая в норме должна содержать лишь несколько сотен звезд. Единственное достоверное объяснение – черная дыра. Мазерное излучение – редкость, и повторить такой эксперимент трудно, но скоро, возможно, это удастся благодаря интерферометрии на миллиметровых волнах[187].

Массу спящих черных дыр галактик в наших космических окрестностях можно оценить по движению газа или звезд вблизи их ядер, но несколько десятилетий этой работы принесли результаты всего по 70 черным дырам. Применить этот метод дальше скопления Девы, до которого около 60 млн световых лет, при нынешней технологии невозможно.

Квазары, как мы видели, имеют сверхмассивные черные дыры, действующие как гравитационные машины по преобразованию падающей в них массы в мощное излучение. Почему бы не оценивать массы черных дыр по яркости? Хорошая идея, но неприменима на практике. Яркость различных квазаров, в отличие от настоящих прожекторов со стандартными характеристиками, разнится в тысячи раз. У конкретной черной дыры яркость зависит от эффективности аккреции, скорости осевого вращения и количества газа и пыли в центральной области. К сожалению, по мощности квазара невозможно судить о массе черной дыры.

Как только показалось, что дальше двигаться некуда, астрономы предложили новый изящный метод оценки массы черной дыры в ближних активных галактиках. Он использует одну из отличительных особенностей квазара – широкие эмиссионные линии. Горячий газ, порождающий эти линии, находится в пределах одного светового года от центрального объекта, поэтому его движением управляет черная дыра. Газ в этой области должен подчиняться простому уравнению $M_{BH} ? RV^2/G$, где G – гравитационная постоянная, а V – скорость газа. При помощи того же уравнения мы можем вычислить массу Солнца, зная расстояние до обращающейся вокруг него планеты и ее скорость. В случае черной дыры скорость обращающегося газа легко вывести из ширины линий излучения. Неизвестным остается только R – размер области, в которой рождаются широкие эмиссионные линии. Различные предположения в

физике оценивают его в 0,01 парсек, или 10 световых дней, – в десять раз больше Солнечной системы (илл. 35)[188]. Это слишком мало, чтобы область стала различимой даже через самый сильный телескоп – для большинства галактик. Как ее измерить? Оригинальный метод опирается на конкретный факт: интенсивность света квазаров и активных галактик непостоянна.



Илл. 35. Схематичное поперечное сечение внутренней области активной галактики или квазара показывает компоненты, позволяющие измерить массу центральной сверхмассивной черной дыры (СМЧД). Когда свет, вырабатываемый центральной машиной, меняется, газовые облака в области свечения широких спектральных линий (Broad Line Region, BLR) реагируют с задержкой от 10 до 100 световых дней. Скорость облаков измеряется по ширине их спектральных линий. В результате можно оценить массу черной дыры, управляющей этим движением. Метод называется эхо-картированием. *К. Риччи / Католический университет Чили*

Давайте представим себе эту ситуацию. Аккреционный диск, обеспечивающий колоссальную яркость квазара, весьма мал – мы будем считать его точечным источником света. Его яркость меняется на интервале нескольких дней, что стало одним из первых аргументов в пользу сверхмассивных черных дыр, поскольку источник не может быть больше времени перемещения света через его поперечник. Логика этого аргумента такова: если причиной изменения яркости является единственный объект, то чем быстрее она меняется, тем меньше должен быть этот объект. Свет из центральной точки источника проникает наружу и через некоторое время сталкивается с быстро движущимся газом, порождающим эмиссионные линии. Этот газ повторяет изменения яркости центрального источника света («отзывается эхом») с

задержкой t, определяемой временем движения света через газ: $t = R/c$, где c – скорость света. Метод называется эхо-картированием, поскольку мы составляем карту «эха» для колебаний света от точечного источника. Время прибытия отзвуков указывает на размер области горячего газа.

Необходимо вести несложные, но тщательные наблюдения. Начинается наблюдательная «кампания»: телескопы по всему миру измеряют спектры отобранных квазаров или активных галактик. Если несколько телескопов в разных точках мира обеспечивают круглосуточное наблюдение за изменениями светимости, это гарантирует получение данных, даже если в одном или двух местах наблюдения невозможны из-за облачности. Спектры собирают в течение недельных наблюдений, повторяющихся несколько раз в год, поэтому в выборку попадают все временные шкалы, от нескольких дней до нескольких месяцев. Газ, вызывающий свечение эмиссионных линий, «откликается» на излучение черной дыры с задержкой, равной времени движения света до него. Эта задержка позволяет определить размер области свечения широких спектральных линий, который, в свою очередь, дает информацию о массе черной дыры[189].

Итак, эхо-картирование основывается на временном, а не пространственном разрешении. Метод был впервые применен к NGC5548 – одной из активных галактик, открытых Сейфертом; черная дыра в ее центре в 65 млн раз массивнее Солнца, с погрешностью 4 %[190]. Кампании интенсивного мониторинга с использованием малых телескопов позволили установить массы 60 черных дыр ближних активных галактик[191]. Исследования показывают: чем мощнее активная галактика, тем больше ее область быстро движущегося газа.

Здесь начинается самое интересное. Кропотливая работа по эхо-картированию показывает, как размер области свечения эмиссионных линий соотносится со светимостью активной галактики. Теперь вместо долгосрочного мониторинга с сотнями или тысячами измерений по интересующей нас активной галактике можно оценивать массу черной дыры по одному-единственному спектру. Ширина линий излучения дает V, а светимость – R, и это все, что нужно для решения уравнения $M_{BH} ? RV^2/G$. Массы черных дыр рассчитываются по единичным спектрам с погрешностью в три раза большей, то есть 300 %, – этого достаточно для статистики. Больше не нужно тратить месяцы наблюдений на определение массы одной черной дыры – можно за одну ночь оценить массы ста черных дыр. Уже опубликованы массы десятков тысяч этих объектов[192]. Астрономы собирают урожай черных дыр в промышленных

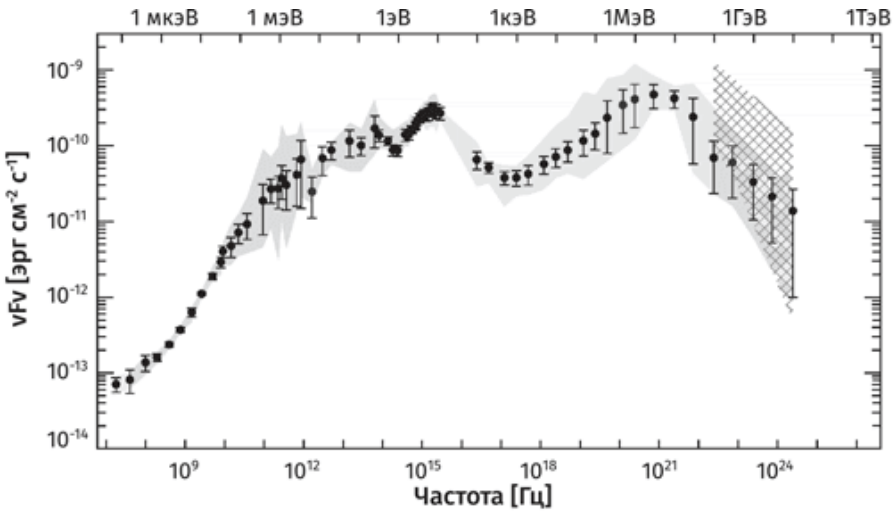
масштабах.

Энергия аккреции в космосе

Материя падает в черную дыру и нагревается. Кроме того, энергия вращения черной дыры ускоряет частицы, которые затем испускают излучение. Это чрезвычайно эффективный процесс. Если определять эффективность отношением выделенной энергии к энергии массы всех входящих ингредиентов, то эффективность аккреции черной дыры составит около 10 %. Для сравнения: у ядерного распада или синтеза этот показатель равен 1 %, а у химических процессов с выделением энергии – 10^{-7}%. Материя может высвободить 10 % своей массы-энергии просто в процессе падения!

Сколько нужно массы, чтобы превратить сверхмассивную черную дыру в квазар? Не слишком много. Чтобы черная дыра в 100 млн солнечных масс выделяла энергию уровня квазара, 10^{39} Вт при эффективности в 10 %, она должна поглощать всего одну массу Солнца за год[193]. Вдумайтесь, проглатывая лишь одну звезду в год, черная дыра может сиять ярче целой галактики со всеми ее звездами! Говоря словами Джона Апдайка: «В одной незамеченной звезде хватит энергии для всех небес, когда-либо выдуманных сумасшедшими»[194]. Однако питать черную дыру сложно, поскольку излучение квазара вызывает давление, отталкивающее материю от центрального источника. Оно аналогично давлению излучения, разворачивающему хвост кометы в противоположную от Солнца сторону. Для аккреции материи гравитация, направленная внутрь сверхмассивной черной дыры, должна превышать направленное вовне давление излучения.

Астрономам потребовалось много времени, чтобы составить полную картину аккреции в активных галактиках. Дело в том, что физические процессы вблизи черных дыр приводят к выделению энергии в огромном диапазоне частот[195]. Например, эталонный квазар 3C 273 был зарегистрирован на частотах от 10^{8} Гц до 10^{24} Гц – разброс длин волн в 10 000 трлн раз, от трехметровых радиоволн до гамма-излучения длиной в одну треть размера протона (илл. 36). Однако из всего этого разнообразия наземные обсерватории способны зарегистрировать лишь широкую полосу радиочастот и узкий сегмент от ближней инфракрасной до оптической области. Для остального нужны специальные спутники на орбите Земли.



Илл. 36. Распределение энергии яркого квазара 3C 273 по всему электромагнитному спектру, от длинных радиоволн (10^8 Гц) до высокоэнергетических гамма-лучей (10^{24} Гц). По вертикальной оси указана энергия, по горизонтальной — частота (внизу) или энергия (вверху). Звезды и нормальные галактики излучают только в узком оптическом и инфракрасном диапазоне, поэтому такой широкий диапазон излучения свидетельствует о гравитационной энергии и ускорении частиц возле сверхмассивной черной дыры. *С. Солди / Парижский университет / Национальный центр научных исследований Франции*

Если смотреть на Вселенную лишь в одной части электромагнитного спектра, информация о ней будет неполной: возникает проблема «слона и слепцов». Чтобы всесторонне изучить энергию аккреции, нужно увидеть слона целиком. Оказалось, что радиоизлучение, впервые привлекшее внимание к активным галактикам в 1950-х гг., – это очень малая часть энергии квазара. Излучение исходит от релятивистских электронов возле черной дыры и в парных джетах – назовем его хвостом слона. Следующим по значимости компонентом является высокоэнергетическое рентгеновское излучение, источником которого также являются релятивистские электроны, – это хобот слона. Еще более важное – инфракрасное излучение холодной пыли (температурой 10–100 кельвинов) находящейся еще дальше от черной дыры. Пыль – слоновья нога. Основную роль в энергии квазара играет аккреционный диск, очень близкий к черной дыре. Он имеет температуру около 100 000 кельвинов и выделяет большую часть своей энергии в ультрафиолетовом и рентгеновском диапазонах[196]. Это основная часть слона, его

тело.

Радиоизлучение позволило вычислить активные галактики, различимые на обычно тихом радионебе. Однако за несколько лет астрономы поняли, что большинство активных галактик невидимо при радиопоиске, так как имеет слабое радиоизлучение. Оптический поиск обнаружил в десять раз больше этих объектов, чем радиоисследования. Затем в 1980-е гг. специалисты по рентгеновской астрономии занялись слабым рентгеновским сигналом, наблюдающимся по всему небу[197]. Они предположили, что это сумма многих дальних источников – слишком слабых, чтобы зарегистрировать их по отдельности, но когда они добавили в картину расчетное рентгеновское излучение имевшихся оптических образцов активных галактик, оно оказалось в десять раз слабее рентгеновского фона. Проблема окончательно не решена, но теперь ясно, что рентгеновский фон создают активные галактики, выпадающие из оптических исследований[198]. Пыль делает их невидимыми. Наличие пыли может радикально изменить распределение энергий активной галактики, преобразуя оптическое излучение в инфракрасное. Пыль не влияет на фотоны рентгеновских лучей, поэтому рентгеновские исследования дают самую четкую и полную картину популяции активных галактик.

Массивные черные дыры – не страшные

Давайте попробуем побороть страх, который вызывают черные дыры. Это не космические пылесосы, втягивающие в себя все, что их окружает. У них действительно есть сфера гравитационного влияния, как у любого тела, имеющего массу, но, если бы Солнце внезапно уплотнилось в черную дыру, гравитация на расстоянии Земли не изменилась бы, и ничем не потревоженная Земля продолжила бы движение по своей орбите (хотя восемь минут спустя людей *чрезвычайно* потревожила бы утрата солнечного света и энергии). Во-вторых, нам не грозит опасность повстречаться с черной дырой. Лишь малая доля звезд умирает как черные дыры, и в окрестностях Солнца нет черных дыр[199].

Ближайшая черная дыра звездной массы – V616 Mon. Она примерно в десять раз больше Солнца по массе и находится в 3000 световых лет. Следующая по удаленности – эталонная черная дыра Лебедь X-1: 15 солнечных масс, дистанция 6100 световых лет. Однако еще много десятилетий у нас не будет технологий, чтобы посетить черную дыру – даже с помощью миниатюрных космических зондов, поэтому любой разговор о

падающих в нее людях остается гипотетическим. Ближайшая массивная черная дыра – в 4 млн солнечных масс – находится в центре Млечного Пути на расстоянии 27 000 световых лет. Ближайшая сверхмассивная черная дыра расположена в центре гигантской эллиптической галактики M87 в 60 млн световых лет, в скоплении Девы. Это чудище «тянет» на целых 5 млрд масс Солнца.

Однако массивные черные дыры – вовсе не монстры. Формула радиуса Шварцшильда, определяющего горизонт событий, – $R_s = GM/c^2$, поэтому размер горизонта событий пропорционален массе. Он составляет 300 млн км, или двойное расстояние от Земли до Солнца, у черной дыры квазара – в 100 млн раз более массивной, чем Солнце. Поскольку с увеличением массы линейно растет размер, плотность в пределах горизонта событий падает пропорционально квадрату массы. Черная дыра звездной массы в три раза массивнее Солнца имеет плотность в 10 000 трлн раз выше, чем вода, тогда как черная дыра в центре галактики всего в 1000 раз плотнее воды. Черная дыра квазара в 100 млн солнечных масс имеет плотность всего 10 % плотности воды, а плотность самых больших черных дыр – еще в 10 000 раз меньше. Как же страшна черная дыра с меньшей плотностью, чем воздух, которым мы дышим!

Задумайтесь об этом. Если взять пространство размером с Солнечную систему и наполнить его воздухом, получилась бы черная дыра. А если бы вы создали достаточно большой океан, черная дыра всплывала бы в нем, как пузырь.

Пересечение горизонта событий массивной черной дыры, возможно, намного менее опасно, чем проникновение в черную дыру звездной массы. Как минимум спагеттификация гораздо менее вероятна. Ускорение вследствие силы растяжения быстро падает с увеличением массы компактного объекта. На горизонте событий черной дыры в 100 млн солнечных масс оно на порядки меньше ускорения вследствие земного тяготения. Бесстрашный путешественник пересек бы горизонт событий, ничего не почувствовав.

И здесь начинается самое отчаянное приключение космического путешественника из далекого будущего. Найдите черную дыру – подойдет любая, если она более чем в 1000 раз массивнее Солнца. Соберите друзей и родных в космическом корабле и держите их на безопасном расстоянии. Они будут знать, что видят вас в последний раз, поскольку выбраться из черной дыры невозможно. Затем отправьте свой корабль по курсу свободного падения на горизонт событий. Приближаясь к горизонту событий, помашите им как ни в чем не бывало. Друзья

увидят, как растягивается и деформируется ваше изображение. Оно еще и покраснеет, поскольку фотонам придется преодолеть мощную гравитацию черной дыры. Вы же не увидите и не почувствуете ничего необычного, проходя через горизонт событий и направляясь к своей интригующей, но неведомой судьбе. Близкие же наблюдают прощальную сцену: незавершенный взмах рукой – и ваш образ растворяется в красном и застывает в вечности.

•••

Давайте подытожим, что мы узнали.

Хотя некоторые ученые прошлого предвидели существование черных дыр, для научного предсказания потребовалась совершенно новая теория гравитации. Их свойства настолько необычны, что даже автор теории Альберт Эйнштейн не верил в существование подобных чудовищ. Физики загорелись идеей черных дыр и с двойным рвением бросились приводить в соответствие теории гравитации и квантового мира.

Далее все зависело от наблюдателей. Реально не всё, что мы можем вообразить, разработать в теории и рассчитать. Черные дыры формируются, когда умирает массивная звезда, но они неразличимы для глаза, и их можно увидеть только тогда, когда они вращаются вокруг видимой звезды. После нескольких десятилетий кропотливой работы ученые нашли несколько десятков двойных систем, в которых темный партнер настолько массивен, что может быть только черной дырой. Наблюдения оказались убедительными. Теоретики, оспаривавшие существование черных дыр, были посрамлены.

Тем временем астрономы накапливали свидетельства того, что галактики – не просто большие скопления звезд. В центре некоторых галактик находится завихренный горячий газ и заметные почти через всю Вселенную источники мощного радио- и рентгеновского излучения – более яркого, чем целая галактика. Источником излучения является гравитация черных дыр в миллионы или даже миллиарды раз массивнее Солнца. По иронии астрофизики настолько темный объект может давать столько света. Наша собственная Галактика прячет массивную черную дыру. Она темна и дремлет, переваривая пищу, но она обнаружима по сонму звезд, носящихся вокруг нее со скоростями в миллионы километров в час.

Теоретики предсказывали, что черные дыры должны находиться во всех галактиках. С помощью таких инструментов,

как космический телескоп «Хаббл», астрономы подтвердили эту гипотезу, обнаружив черные дыры. Какие-то – неактивные и темные, другие – жадно поглощающие газ и ярко сияющие. Ученые установили массу огромного количества черных дыр. Это исследование лишило черные дыры ореола исключительности и мрачности и превратило их в неотъемлемый элемент Вселенной – что не делает их менее потрясающими.

Теперь можно рассмотреть и результаты существования черных дыр. Мы проследим историю их жизни и роль в эволюции Вселенной ретроспективно вплоть до Большого взрыва. Мы узнаем, как их моделируют на компьютере, и зададимся вопросом, возможно ли создать их в лаборатории в принципе. Мы узнаем, как с помощью черных дыр проверить теорию гравитации и как были обнаружены колебания пространственно-временного континуума, вызываемые их слиянием. Наконец, мы попробуем предсказать судьбу черных дыр на протяжении почти бесконечного космического времени.

Часть II. Черные дыры: прошлое, настоящее и будущее

Как складывается жизнь черных дыр? Астрономы полагают, что некоторые черные дыры могли образоваться вскоре после Большого взрыва, когда новорожденная Вселенная была горячей и плотной. С тех пор по мере гибели массивных звезд формировались маленькие черные дыры, а большие росли, пожирая газ в центре галактик или объединяясь при галактическом слиянии. Во второй части книги мы узнаем, как образуются и растут черные дыры разной величины. Теперь, когда их существование уже не подвергается сомнению, астрономы разрабатывают программы наблюдения, подбираясь все ближе к горизонту событий. Исследователи также научились анализировать свойства черных дыр в безопасных условиях компьютерного моделирования.

Черные дыры – это опытный полигон для теории гравитации. Теперь теорию относительности ждет самая серьезная проверка в истории. В последующее десятилетие исследования черных дыр в основном сосредоточатся на регистрации гравитационных волн, колебаний пространственно-временного континуума, которые являются главным предсказанием общей теории относительности. Несколько лет назад, когда впервые были зарегистрированы слияния с участием черной дыры, в астрономии возникло новое направление. Детекторы гравитационных волн скоро будут способны регистрировать слияния черных дыр во всей наблюдаемой Вселенной с частотой в одно событие в неделю. Если человечество доживет до этого момента, наши отдаленные потомки смогут вблизи наблюдать слияние черной дыры, которая находится в центре нашей Галактики, с аналогичной дырой в галактике Андромеды.

Наконец, мы узнаем, как растут и впоследствии умирают от голода черные дыры по мере расширения Вселенной и рассеивания галактик. Даже самые большие черные дыры однажды испарятся, мало-помалу растрачивая себя в излучении Хокинга. Ничто не вечно – ни Вселенная, ни черные дыры.

5. Жизнь черных дыр

Во Вселенной есть черные дыры разных размеров: от объектов величиной с мегаполис с массой звезды до гигантов размера Солнечной системы с массой галактики. Как рождаются и проживают свою жизнь черные дыры? История начинается с Большого взрыва и продолжается бурной гибелью звезд и схождением массы в центрах галактик. Используя наблюдение, теоретические знания, компьютерное моделирование и капельку воображения, астрономы воссоздали историю черных дыр. Они даже задались вопросом, не является ли черной дырой сама Вселенная.

Семена Вселенной

В ранней Вселенной царили хаос и неупорядоченность. По мере формирования галактик, звезд и планет гравитацией Вселенная становилась «комковатой», она никогда не была *идеально* равномерной. Сразу после Большого взрыва появились небольшие неоднородности, и, поскольку средняя плотность Вселенной была чрезвычайно высокой, гравитация в этих областях должна была быть очень сильной. Таким образом, семена будущих галактик возникли еще в ранней Вселенной. Это еще не все. В том же году, когда Стивен Хокинг предсказал излучение, получившее его имя, он вместе со своим студентом Бернардом Карром написал статью о черных дырах, которые могли сформироваться в очень молодой Вселенной, – первичных черных дырах[200]. Они утверждали, что, даже если вариации плотности, случившиеся сразу же после Большого взрыва, были в среднем слабыми, в некоторых областях пространства они могли быть достаточными для создания гравитационного притяжения, превосходящего силу космического расширения. В этих местах должен был происходить гравитационный коллапс и могла образоваться черная дыра. Этот процесс мог вести к появлению черных дыр практически любой массы. Могли ли первичные черные дыры Хокинга стать вселенскими семенами?

Самые ранние черные дыры должны были сформироваться в так называемое планковское время[201] – период продолжительностью 10^{-43} секунды после Большого взрыва, когда размер Вселенной составлял 10^{-35} м. Образовавшиеся тогда черные дыры имели бы массу 10^{-8} кг – примерно как у крупицы пыли. Эти ранние черные дыры не могли расти из-за быстрого расширения Вселенной, поэтому быстро испарились. Любая

черная дыра, сформировавшаяся менее чем через 10^{-23} секунды после Большого взрыва и имеющая массу менее 10^{12} кг, к настоящему моменту уже должна была испариться, но более поздние и массивные могли дожить до наших дней. Первичная черная дыра, образовавшаяся через секунду после Большого Взрыва, имела бы массу по меньшей мере в 100 000 солнечных – ненамного меньше, чем у массивной черной дыры в центре Млечного Пути.

Согласно другой интересной теории, первичные черные дыры могли сохраниться в неожиданной форме. Последние 40 лет астрономы пытаются решить проблему темной материи. Звезды в галактиках всех типов движутся слишком быстро – и это нельзя объяснить их собственной гравитацией. Представляется, что целостность галактик поддерживает какой-то дополнительный компонент массы, в пять или шесть раз больший, чем сумма всех звезд[202]. Эта темная материя оказывает гравитационное воздействие, но не излучает свет и никак не взаимодействует с излучением. Результаты гравитационного линзирования показывают, что темная материя заполняет и пространство между галактиками. Что если темная материя состоит из первичных черных дыр? Это интересная идея. Теоретически первичные черные дыры, как и темная материя, должны образовываться в космосе повсеместно, и если отвести им роль источника темной материи, то не придется изобретать новую элементарную частицу, не вписывающуюся в нормальную физику (и до сих пор не обнаруженную в экспериментах с ускорителями).

К сожалению, тщательные наблюдения исключили основные варианты существования первичных черных дыр, в том числе и в форме темной материи. Когда черная дыра испаряется, то дает мощное гамма-излучение; но, когда к 1980-м гг. NASA вывело на орбиту спутниковые детекторы рентгеновских лучей, они не обнаружили излучения с ожидаемыми характерными признаками. Гравитационное линзирование исключает широко распространенные черные дыры с массами от галактической до земной. Недавние теоретические исследования закрыли последнее окно возможностей: это черные дыры от 10^{14} до 10^{21} кг, то есть от массы всего углерода в атмосфере Земли до массы небольшого спутника планет Солнечной системы[203]. Первичных черных дыр не так много, чтобы объяснить темную материю, но это не значит, что они не существуют в той или иной форме. Они предсказываются космологической теорией и потенциально могут пролить свет на раннюю историю Вселенной. Поиск продолжается.

Первый свет и первая тьма

Всего через несколько секунд после Большого взрыва условия перестали быть благоприятными для формирования первичных черных дыр. В этот момент Вселенная была почти однородным варевом из высокоэнергетических частиц и фотонов с вариациями по плотности в пространстве менее 0,001 %. Через несколько минут после Большого взрыва температура упала настолько, что могли образовываться ядра атомов. Синтез преобразовал четверть массы Вселенной из водорода в гелий со следовыми количествами лития и изотопов водорода и гелия. Это заняло не больше времени, чем уходит на варку яйца. Температура была 10 млн ˚C; чтобы увидеть в то время Вселенную, нужно было обладать рентгеновским зрением[204].

Вселенная продолжила расширяться и остывать. Следующий важный этап был пройден примерно через 50 000 лет, когда плотности энергии материи и излучения сравнялись. После этого плотность энергии излучения падала быстрее массовой плотности, поскольку расширение приводило к красному смещению фотонов. В результате гравитация усилила хватку, и во Вселенной начали возникать крохотные вариации плотности. Вселенная имела температуру 10 000 ˚C. Будь там наблюдатель, он увидел бы ее голубое свечение. Примерно через 400 000 лет после Большого взрыва температура упала до 3000 ˚C, и электроны объединились с ядрами, образовав стабильные атомы. Впервые излучение стало свободно распространяться, «красный туман» рассеялся, обнажив возникающие структуры.

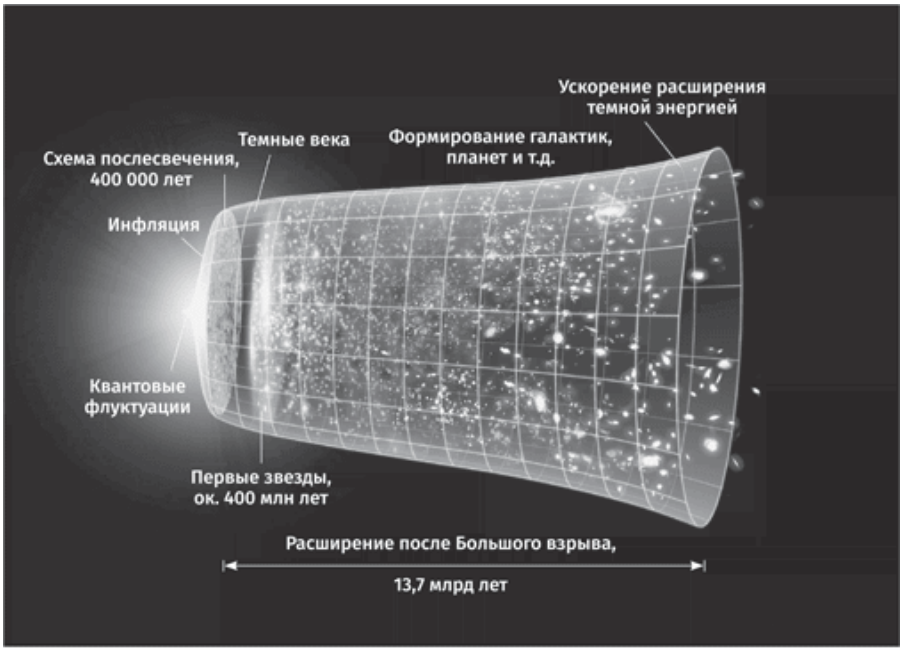
Все это случилось на заре истории Вселенной. По сравнению с ее нынешним возрастом 13,8 млрд лет, 400 000 лет – мгновение, аналог первых десяти часов жизни 40-летнего человека. По мере расширения Вселенная исчезала из виду, ее излучение из тусклого красного становилось невидимым инфракрасным. Начались Темные века[205]. Они длились до возникновения первых звезд и галактик – примерно через 100 млн лет после Большого взрыва, таким образом, вся эта эпоха заняла первый 1 % возраста Вселенной.

Что интересно, хотя первый краткий этап существования Вселенная был темным, он, возможно, не был безжизненным. Между 10 и 20 млн лет после Большого взрыва Вселенная имела температуру от точки кипения до точки замерзания воды. В сегодняшней Вселенной чрезвычайно холодно, а биологическая жизнь, какой мы ее знаем, способна существовать только в узкой обитаемой зоне вблизи звезд, а также, возможно, в более холодных местах под поверхностью планеты или ее естественного

спутника, где вода остается жидкой благодаря давлению сверху и радиоактивному теплу снизу. Однако было время, когда вся Вселенная имела температуру обитаемой зоны. Неясно, могли ли редкие ранние звезды наработать достаточно углерода для развития биологических форм и тяжелых элементов для формирования планет, на которых обитали бы эти существа[206]. Сомнительно также, что 20 млн лет – достаточный срок для возникновения жизни из простых химических соединений.

С Темными веками связан ряд важнейших вопросов космологии. Когда они завершились? Что сформировалось раньше – звезды или галактики? Как на процессы формирования влияло отсутствие тяжелых элементов? Какими методами лучше всего регистрировать первый свет во Вселенной? И главный вопрос для нашего повествования: какие черные дыры образовались раньше всего?

Предположим, что темная материя – это предсказанная теоретиками элементарная частица нового типа, объединяющая три силы природы. В качестве элемента космологии темная материя довольно проста: она оказывает гравитационное воздействие, но не взаимодействует со светом или любым другим излучением[207]. Темной материи в шесть раз больше, чем нормальной, следовательно, она управляет формированием структуры Вселенной. По мере того как гравитация концентрирует темную материю, начинают возникать сгустки малого размера или массы. Первые структуры, образовавшиеся через 100 млн лет после Большого взрыва и по окончании Темных веков, состояли из 10^6 солнечных масс темной материи. Это масса крохотной карликовой галактики в современной Вселенной. Время шло, сгустки сливались во все более крупные. В каждом сгустке темной материи содержался «комок» нормального вещества (газа) в одну шестую массы темной материи, и этот газ коллапсировал в центр гравитационного «колодца» темной материи. При коллапсе газа сформировались звезды, был излучен первый свет. Согласно сценарию «снизу вверх», маленькие объекты образуются раньше больших, звезды – раньше галактик (илл. 37)[208].



Илл. 37. Двумерное изображение эволюции Вселенной с момента Большого взрыва 13,7 млрд лет назад. Раннее экспоненциальное расширение уступает место более медленному. Вселенная остается темной в промежутке от 400 000 до нескольких сот миллионов лет после Большого взрыва, когда формируются первые звезды и черные дыры. Массивные черные дыры растут благодаря слиянию галактик и попаданию газа в галактики. Последние 5 млрд лет расширение идет ускоренными темпами вследствие темной энергии. *NASA / команда проекта WMAP*

Вселенная была совсем другой, когда кончились Темные века и вспыхнули первые светила. Она была в 30 раз меньше, в 30 раз горячее и в 30 000 раз плотнее, чем сейчас. Другим принципиальным отличием было отсутствие элементов тяжелее водорода или гелия. Процесс формирования звезд требует сброса тепла в окружающее пространство, чтобы гравитация могла вызвать коллапс газового облака. Углерод и кислород имеют спектральные переходы, которые очень эффективно уносят энергию. Отсутствие этих элементов в ранней Вселенной означает, что облака, из которых формируются звезды, были более горячими и массивными. В локальной и современной Вселенной верхний предел массы звезды составляет примерно 100 масс Солнца. В ранней Вселенной первые звезды, вероятно, достигали 200–300 солнечных масс. Очень давно в сгустках темной материи массой в миллион солнечных масс возникали звезды, которые были в среднем в десятки раз массивнее тех, что

формируются сейчас в окрестностях Солнца.

Жизнь первых звезд была короткой. Они исчерпывали ядерное топливо за несколько миллионов лет. При компьютерном моделировании самые массивные звезды взрываются, становясь сверхновыми, не оставляя ничего после себя, или сразу коллапсируют в черную дыру от 20 до 100 солнечных масс. Как и первые звезды, оставшиеся после них черные дыры массивнее черных дыр, обнаруживаемых нами поблизости, в Млечном Пути.

Все, что вы сейчас читаете, основывается на теории и компьютерном моделировании. Что можно сказать об экспериментальном поиске первого света? Есть два подхода, и оба подобны поиску иголки в стоге сена, поскольку первые звезды – немногочисленны, а Вселенная неустанно создавала звезды в течение 14 млрд лет. Первый подход заключается в поиске в Млечном Пути звезд, состоящих только из водорода и гелия, что означало бы, что они образовались из газа, не «загрязненного» никакими предшествующими поколениями звезд. В 2012 г. группа ученых Европейской южной обсерватории обследовала тусклую звезду в рамках Слоуновского цифрового небесного обзора и обнаружила, что содержание в ней тяжелых элементов в 200 000 раз меньше, чем в Солнце[209]. При возрасте 13 млрд лет – это лучший кандидат в первичные звезды[210].

Второй подход заключается в поиске звезд без тяжелых элементов в далеких галактиках. В 2015 г. другая европейская группа увидела древние звезды в галактике с красным смещением $z = 6{,}6$, означающим, что свет датируется менее чем миллиардом лет после Большого взрыва. Ее руководитель Давид Собрал из Лиссабонского университета назвал галактику CR7 – в соответствии с сокращением от «космическое красное смещение 7»[211], а также в честь своего любимого футболиста Криштиану Роналду. Собрал сказал: «Ничего более потрясающего нельзя себе представить. Это первое прямое свидетельство о звездах, которые в конечном счете сделали возможным наше существование, синтезировав тяжелые элементы и изменив химический состав Вселенной».

Рождение черной дыры в звездном катаклизме

В июле 1967 г. два американских спутника Vela зарегистрировали импульсы гамма-излучения. Созданные во времена холодной войны, эти спутники должны были фиксировать факты нарушений Советским Союзом Договора о запрещении испытаний ядерного оружия 1967 г.[212] Общественность не знала, что в то время правительство США

находилось в состоянии повышенной готовности к войне.

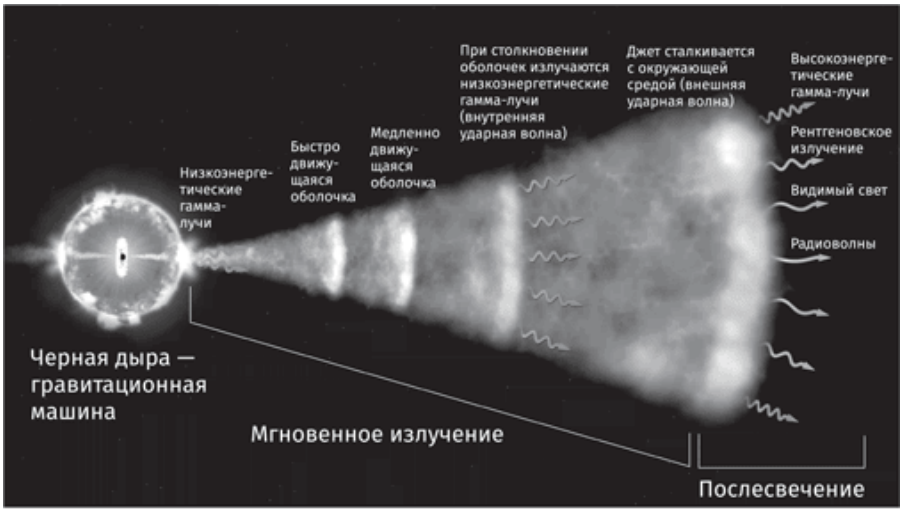
К счастью, команда ученых из Национальной лаборатории в Лос-Аламосе доказала, что вспышки гамма-лучей не характерны для испытаний ядерного оружия, и сделала вывод, что их источники находятся далеко за пределами Солнечной системы. В 1973 г. с этого открытия был снят гриф секретности и опубликована посвященная ему научная статья[213]. Однако тайна все больше окутывалась мраком. Где-нибудь в небе ежедневно происходил гамма-всплеск. На краткий миг эти источники в гамма-диапазоне становились ярче всей остальной Вселенной, но быстро гасли – излучение длилось примерно от нескольких миллисекунд до 30 секунд. Оценки местоположений вспышек гамма-спутниками были слишком грубыми, делая невозможным дальнейшее отслеживание, а источники проявлялись случайно, что не давало никакого намека на их происхождение.

Прорыв произошел в конце 1990-х гг., когда для сбора данных на орбите начали использовать быстродействующий рентгеновский телескоп. Он мог быстро разворачиваться и успевал зарегистрировать низкоэнергетическое рентгеновское излучение гамма-всплеска, а точное определение положения событий по рентгеновскому излучению позволяло оптическим астрономам ловить затухающее послесвечение. Спектроскопия показала, что объекты-источники вспышек находятся в далеких галактиках в миллиардах световых лет от Земли. Судя по большому расстоянию, вспышки должны быть феноменально яркими. В 2008 г. одну из них можно было наблюдать невооруженным глазом в течение 30 секунд, хотя событие произошло через пол-Вселенной от нас. Свет, вспыхнувший на краткий миг в 2008 г., излучился за 3 млрд лет до формирования Земли[214]. Другая вспышка, наблюдавшаяся в 2009 г., случилась в галактике с красным смещением $z = 8{,}2$, то есть на момент события возраст Вселенной составлял лишь 4 % нынешнего[215]. При самых мощных вспышках выделяется энергия порядка 10^{44} Дж. Такой объем энергии Солнце выделит за всю свою жизнь, но он излучается за секунду, а не в течение десяти с лишним миллиардов лет!

Когда затухает гамма-всплеск, поймать оптическое послесвечение – это единственная возможность измерить красное смещение и светимость, которые позволяют узнать возраст объекта и оценить его массу. Несколько лет назад, находясь у 6,5-метрового Многозеркального телескопа (ММТ)[216] обсерватории Маунт-Хопкинс в Аризоне, я получил срочное оповещение по интернету. Спутник NASA Swift зарегистрировал гамма-всплеск, и по всему миру разослали запрос на проведение спектрального

анализа. Было три часа ночи, но я отодвинул в сторону чашку кофе: ничто так не бодрит, как возможность наблюдать звездный катаклизм. Через считаные минуты мы были готовы. На телемониторе ничего не было видно, поэтому мы работали вслепую, надеясь нащупать сигнал. На следующий день обработанные данные принесли нам зазубренную полосу со следами эмиссионных линий – недостаточно сильными, чтобы измерить красное смещение. На следующую ночь сигнал ослабел настолько, что уже не регистрировался. В астрономии иногда приходится довольствоваться азартом погони[217].

Астрономы считают, что гамма-всплески – это визитная карточка свежеобразованных черных дыр[218]. Тысячи изученных на данный момент событий делятся на две группы: длинные события с высокой светимостью – и короткие с низкой. Самые яркие всплески обусловлены коллапсом вращающегося ядра массивной звезды – обычно в 30 с лишним раз массивнее Солнца, – при котором формируется черная дыра. Вещество, находившееся возле ядра звезды, падает в черную дыру и закручивается в аккреционный диск. Падающий газ порождает парные джеты вдоль оси вращения, которые движутся со скоростью в 99,99 % световой и, пробив себе путь сквозь поверхность звезды, излучаются в гамма-диапазоне. Значительная часть гравитационной энергии высвобождается в форме нейтрино, а не фотонов (илл. 38). Более короткие всплески, как считается, вызваны слиянием двух нейтронных звезд или нейтронной звезды и черной дыры. В любом случае образуется одна черная дыра. Энергия слияния по большей части выделяется в форме гравитационного излучения, колебаний пространственно-временного континуума, которые распространяются вовне со скоростью света, согласно предсказанию общей теории относительности. Вещество, падающее в новоявленную черную дыру, образует аккреционный диск и дает выброс энергии.



Илл. 38. Гамма-всплеском может сопровождаться бурное рождение черной дыры. С выделением энергии релятивистских джетов, направленных по оси вращения черной дыры, ударная волна порождает чрезвычайно высокоэнергетическое электромагнитное излучение. В течение нескольких секунд такие взрывы являются ярчайшими объектами во Вселенной в гамма-диапазоне и регистрируются на расстояниях в миллиарды световых лет. *NASA / Команда проекта Swift*

Гиперновая звезда – еще более экстремальное событие, при котором формируется черная дыра. Она выделяет в сотни или тысячи раз больше энергии, чем нормально гибнущая массивная звезда во взрыве сверхновой. Рекордсменом стал взрыв, зафиксированный в 2016 г., он был в полтриллиона раз ярче Солнца[219]. Представьте: свет, в 20 раз более яркий, чем свет всех звезд Млечного Пути, сконцентрирован на участке пространства 16 км. Этот взрыв стал самым мощным из зарегистрированных за все время с момента Большого взрыва – умопомрачительный факт, заставляющий усомниться в любой физической теории происхождения высвобожденной при этом энергии.

Подобные колоссальные взрывы вызывают неприятный вопрос: опасен ли звездный катаклизм для Земли? Иными словами, хотя нам не приходится бояться падения в черную дыру, не явится ли черная дыра к нам сама, чтобы поглотить нас? Хорошие новости: это редкие события, происходящие в каждой галактике примерно раз в миллион лет. Кроме того, излучение концентрируется в парных пучках, и взрывы ориентированы в пространстве случайным образом, так что 99,5 % из них проходят мимо нас. Это снижает среднюю повторяемость события до

одного в 200 млн лет на галактику. Плохие новости: если мы случайно окажемся на «линии огня», а вспышка произойдет в пределах нескольких тысяч световых лет, Земля и ее биосфера получат удар высокоэнергетического излучения. Гамма-лучи на 75 % уничтожат озоновый слой, резко подскочит число мутаций. Трудно оценить общее воздействие на экосистему, но, по мнению одной группы ученых, позднеордовикское массовое вымирание, случившееся 450 млн лет назад, было вызвано гамма-всплеском[220]. Данные о вымирании согласуются с разрушением озонового слоя и гибелью наземных биологических видов, однако астрономы не смогли бы обнаружить следы настолько древнего взрыва, поскольку от него осталась лишь черная дыра.

Имеется еще более впечатляющее свидетельство менее разрушительного события, свершившегося уже в историческую эпоху. В 774 г. мир Запада представлял собой лоскутное одеяло из мелких воюющих государств. Карл Великий укреплял королевство, завоевывая Тоскану и Корсику, а в Японии, где буддизм быстро становился государственной религией, императрица Кокэн приказала изготовить миллион свитков со священными текстами – это одни из самых старых печатных трудов в мире. Углеродное датирование показывает, что в деревьях, из которых делали бумагу для этих свитков, замечен резкий рост соотношения углерода-14 к углероду-12.

Этот пик роста – самый веский довод в пользу того, что около 1250 лет назад Землю облучило гамма-всплеском. Углерод-14 радиоактивен и распадается с образованием азота. То, что он вообще существует, объясняется космическими лучами, высокоэнергетическими частицами из космоса, сталкивающимися с азотом в атмосфере. Этот процесс поддерживает постоянный низкий уровень углерода-14, но наблюдающееся в свитках резкое десятикратное увеличение должно иметь дополнительную внешнюю причину. Вторым доказательством служит рост содержания углерода-14 в древесине деревьев Европы и Америки, хотя дату установить сложнее. Третье свидетельство – небольшой скачок радиоактивного бериллия-10 примерно в то же время[221]. Бериллий-10 образуется при попадании высокоэнергетических частиц на открытую поверхность, его концентрация используется для датирования продвижения ледников, лавовых потоков и других геологических событий в каменных породах возрастом до 30 млн лет. Ничто из этого не объясняется вспышкой на Солнце. Для объяснений не подходит и сверхновая, поскольку любая настолько близкая сверхновая была бы видна в дневное время, но записи об этом отсутствуют в средневековых рукописях. Остается только гамма-всплеск[222]. С расстояния около 5000 световых лет

он выбросил бы в земную атмосферу 200 мегатонн энергии гамма-излучения. Послесвечение длилось лишь несколько дней, и, хотя его было видно невооруженным глазом, похоже, этого никто не заметил и не потрудился упомянуть в летописях.

Между тем астрономы положили глаз на массивную звезду WR104, что в 8000 световых годах от нас: вероятно, в ближайшие несколько сотен тысяч лет она погибнет в жестоком коллапсе ядра. Мы не можем определить ее ориентацию в пространстве, и остается надеяться, что, когда это случится, один из мощных джетов не будет направлен на нас. Время астрономических событий вычисляется довольно грубо, так что особо уповать на отдаленность события не приходится. Оно может произойти гораздо раньше. Впрочем, пока у нас есть иные веские причины для тревог.

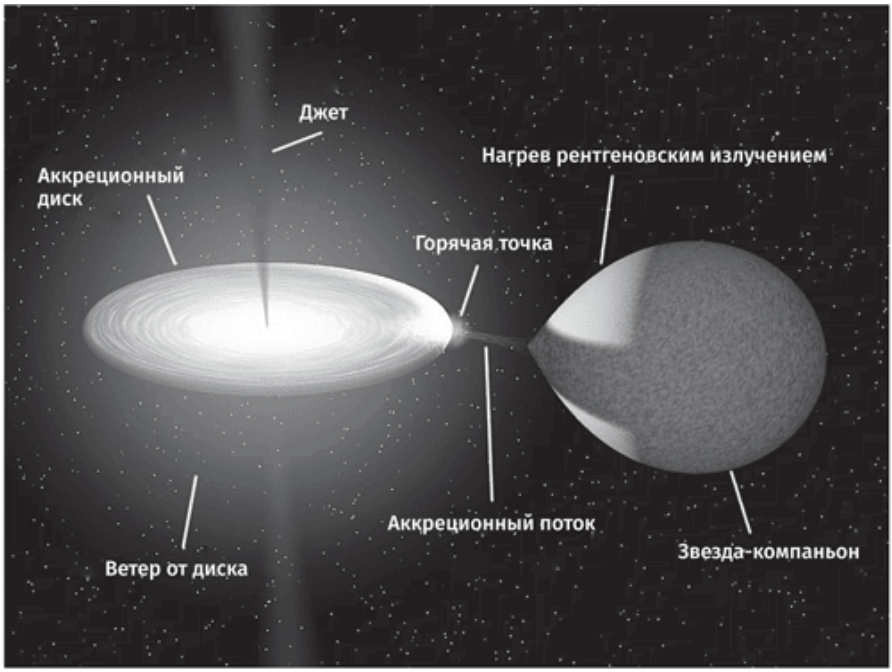
Поиск недостающих звеньев

Мы говорили о двух типах черных дыр. Одни формируются в результате гибели массивной звезды, которая, начав жизнь с массой, составляющей от 8 до 100 солнечных, оставляет после себя темный объект массой от 3 до 50 солнечных. Другие образуются в центре галактики и имеют массу от нескольких миллионов солнечных в неактивных спиральных галактиках – таких как Млечный Путь – до нескольких миллиардов в гигантских эллиптических галактиках наподобие M87. Остается огромный разрыв между массами – 5^{10}, от нескольких десятков до нескольких миллионов масс Солнца. Существуют ли черные дыры промежуточной массы?

Было обнаружено небольшое количество объектов, укладывающихся в разрыв – ближе к его нижней границе. Вспомним, что Артур Эддингтон рассчитал предел яркости черной дыры. Чем активнее питается черная дыра, тем ярче она светится, но, даже если ей от звезды-компаньона по двойной системе достается огромное количество газа, она имеет предел яркости. Давление излучения аккреционного диска противодействует гравитационному притяжению черной дыры, и в какой-то момент избыточный газ, пытающийся упасть в нее, отбрасывается обратно в окружающее пространство. Это так называемый предел Эддингтона. Тридцать лет назад был открыт редкий класс ультраярких рентгеновских источников (ultra-luminous X-ray source, ULX). Они выбрасывают в миллион раз больше суммарной энергии Солнца в виде рентгеновского излучения и имеют такую яркость, что наблюдаются в галактиках, удаленных на миллионы световых лет. Согласно пределу

Эддингтона, эти черные дыры должны быть в сотни или тысячи раз массивнее Солнца, то есть находиться точно посередине разрыва масс[223].

Яркие двойные источники рентгеновского излучения важны по другой причине. Некоторые являются уменьшенными версиями квазаров. Необычная двойная система SS433 находится в 18 000 световых лет, в созвездии Орла. Громадная голубая звезда делает оборот вокруг черной дыры за 13 дней и поставляет газ в окружающий ее аккреционный диск. Часть горячего газа падает в черную дыру, а остальное выбрасывается в парных джетах вдоль оси вращения черной дыры. Газ движется на одной четвертой скорости света, проходя 1,6 км за 20 мкс[224]. SS433 – эталонный микроквазар (илл. 39). Микроквазары имеют все элементы квазара – вращающуюся черную дыру, аккреционный диск, мощное высокоэнергетическое излучение, релятивистские джеты, – но меньше в миллион раз. В Млечном Пути есть только 100 известных нам микроквазаров, но они очень полезны для моделирования и понимания экстремальной астрофизики квазаров[225]. Время потребления топлива квазарами намного превышает человеческую жизнь, тогда как у микроквазаров этот период составляет несколько часов, поэтому их легко наблюдать.

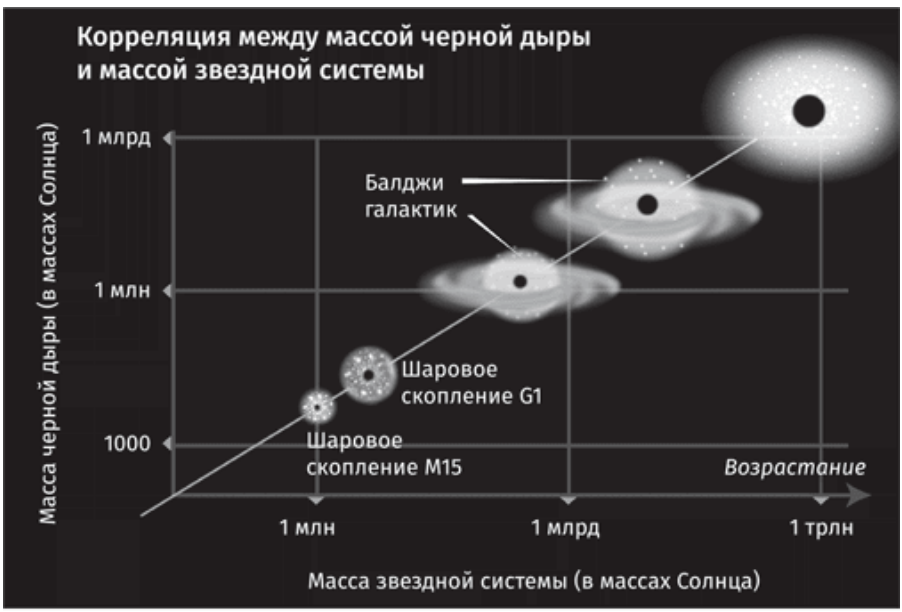


Илл. 39. SS433 — двойная система, состоящая из массивной звезды и черной дыры. Это визуализация, поскольку систему, удаленную на 18 000 световых лет, невозможно рассмотреть в деталях. Газ звезды-компаньона имеет большой импульс, поэтому падает в черную дыру через аккреционный диск. Доплеровские смещения как оптических, так и рентгеновских спектральных линий указывают на скорость релятивистских джетов. Объекты этого типа являются миниатюрной версией квазаров, в них протекают такие же астрофизические процессы. *М. Рапен, Р. Найнес / Национальная радиоастрономическая обсерватория*

Что можно сказать о нижней границе масс сверхмассивных черных дыр? Давайте обратимся к главному предположению минувших десятилетий: тьма лежит в сердце каждой галактики. Квазары и активные галактики редки. Центральные черные дыры большинства галактик неактивны большую часть времени, и их можно обнаружить только по их влиянию на звезды возле центра галактики. Собирая все больше данных о черных дырах соседних галактик, астрономы заметили поразительную зависимость. Масса неактивной центральной черной дыры точно предсказывается разбросом скоростей – диапазоном движений, указывающих на общую массу, – старых звезд галактики[226]. Удивительная корреляция! Черная дыра этого типа распространяет свое влияние лишь на область в самом центре галактики, а звезды галактики имеют в 500 раз бо?льшую массу.

Почему эти разнородные показатели связаны?

Астрономы не дают уверенного ответа, но недавно эта корреляция была также примерена на карликовые галактики и даже шаровые звездные скопления с черными дырами в несколько тысяч солнечных масс (илл. 40). Эллиптические галактики очень велики и почти полностью состоят из старых звезд, поэтому имеют самые массивные черные дыры. В спиральных галактиках – как Млечный Путь – меньше старых звезд, основная часть которых сконцентрирована в маленьком центральном балдже[227], поэтому их черные дыры имеют более скромные размеры.



Илл. 40. Существует достаточно тесная корреляция между массой старых звезд галактики и массой ее центральной черной дыры — в диапазоне в 100 000 раз, от карликовых галактик до гигантских эллиптических. Шаровые звездные скопления в Млечном Пути опускают нижний предел корреляции до нескольких тысяч солнечных масс. Корреляция показывает, что масса центральной черной дыры составляет всего несколько десятых долей процента от звездной массы галактики. *А Филд / NASA / ЕКА*

Наблюдение за небольшими черными дырами – трудная задача, телескопы и детекторы должны работать на пределе возможностей. Лучшими объектами являются шаровые звездные скопления – сферические облака из звезд на орбитах в гало больших галактик. Поскольку они содержат от нескольких сот тысяч до нескольких миллионов звезд, то, согласно вышеописанной корреляции, их черные дыры должны иметь

массу в несколько тысяч солнечных. Сообщалось об их обнаружении, но ни одно заявление не выдержало скрупулезной проверки. Тем не менее несколько объектов заполнили этот пробел. В 2012 г., например, в карликовой галактике ESO 243–29 была обнаружена черная дыра в 20 000 солнечных масс, а в 2015 г. в карликовой галактике RGG 118 – черная дыра в 50 000 солнечных масс.

Самое крупное открытие черной дыры средней массы произошло в конце 2015 г.: японские радиоастрономы заметили облако спирально закрученного газа всего в 200 световых годах от центра Млечного Пути. Они отследили вращение по спектральным линиям 18 разных молекул и сделали вывод о наличии темного объекта в 100 000 масс Солнца. Открытие поддерживает идею того, что черные дыры растут так же, как агрессивные корпорации, – путем слияний и поглощений[228]. Через миллионы лет чудовище в центре нашей Галактики – черная дыра в 4 млн солнечных масс – сожрет эту зверушку среднего размера, вырастет на 2,5 % и, надо думать, удовлетворенно «отрыгнет». Через 27 000 лет эта «отрыжка» будет зарегистрирована на Земле как импульс высокоэнергетического излучения.

Компьютерное моделирование экстремальной гравитации

Эйнштейн совершенно по-новому думал о гравитации. Это не то, что, как утверждал Ньютон, тянет или толкает тела в пространстве. Тело, движущееся вследствие гравитации, следует по кратчайшему пути – так называемой геодезической траектории через искривленный пространственно-временной континуум. Астронавт, медленно падающий в направлении космического корабля, просто следует искривлению пространственно-временного континуума. Луна обращается вокруг Земли, поскольку кратчайший путь сквозь пространственно-временной континуум возвращает ее в одну и ту же точку в пространстве. Двумерная версия этого процесса наблюдается всякий раз, когда вы совершаете длинный авиаперелет. Представьте, что летите из Лос-Анджелеса в Мадрид. Хотя эти города находятся на одной широте, самолет не летит прямо на восток. Он направляется на север и облетает южную оконечность Гренландии, прежде чем направиться на юг. Он следует кратчайшим путем между этими двумя точками, в чем вы убедитесь, если натянете нить через поверхность глобуса. Пилоту незачем поворачивать налево или направо: курс представляет собой прямую линию на

искривленной двумерной поверхности.

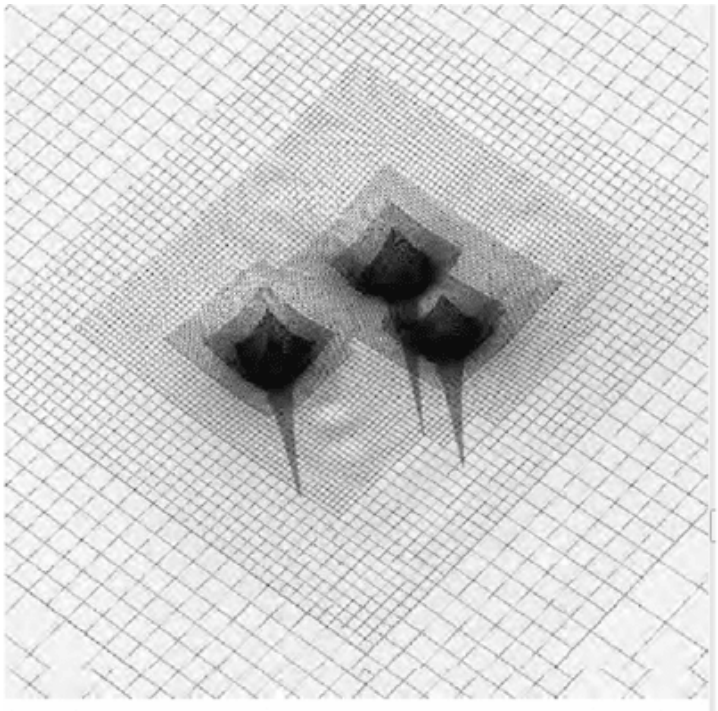
В простейшей форме общий принцип относительности записывается в виде: $G = 8?T$, где G – кривизна пространства-времени в данной точке и T – масса в точке (строго говоря, масса-энергия, но, поскольку энергия согласно уравнению $E = mc^2$ имеет крохотный эквивалент массы, в астрономии можно учитывать только массу). Это короткое уравнение применимо ко всем точкам пространства и включает все, что нам нужно знать о гравитации[229].

Однако это изящное уравнение слишком компактно и непригодно для решения какой бы то ни было реальной проблемы. Чтобы применить общий принцип относительности к объекту наподобие черной дыры, необходимо использовать полное выражение, разворачивающееся в десять отдельных многочленных уравнений. Для их решения требуется сложная алгебра и множество вычислений. Чтобы понять, что происходит, когда сливаются две черные дыры разных масс, приходится использовать каждый член каждого из уравнений Эйнштейна – в письменном виде это 100 страниц зубодробительной математики, и никакие упрощения невозможны.

В 1990-х гг. вместе со стремительным развитием компьютеров и усложнением математических расчетов ученые взялись за численные релятивистские расчеты. Были разработаны приближенные уравнения Эйнштейна. Они опираются на методы, разделяющие пространство и время и рассматривающие пространство на таких малых интервалах, что к ним применяют евклидову геометрию. При компьютерных расчетах используется «адаптивная сетка»: пространственная сетка слишком крупная для слабой и плоской гравитации и слишком мелкая для тех мест, где гравитация сильная и искривленная. Сетка постоянно адаптируется по мере изменения ситуации. Скорость вычислений измеряется числом операций с плавающей точкой в секунду (флопс). Компьютер IBM 7090, являвшийся последним словом техники в 1962 г., имел скорость 100 000 флопс. В 1993 г. самый быстрый компьютер работал в миллион раз быстрее. Теперь рекордная скорость еще в миллион раз выше – ошеломляющие 10^{18} флопс[230]. Национальный научный фонд поддержал и ускорил эти исследования, предложив грант «Большой вызов» за моделирование слияния черных дыр двойной системы[231]. Расчеты принесли некоторые сюрпризы. Слияние может порождать невероятно мощное излучение гравитационных волн: 8 % общей массы черных дыр. Кроме того, когда две черные дыры сливаются, возникающей в результате черной дыре может быть дан «толчок», причем полученной скорости – 400 км/ч – хватит,

чтобы вышвырнуть ее из любой галактики[232].

Давайте метафорически представим себе невидимый пространственно-временной континуум в виде ткани. Холст окрашен гравитацией. До сих пор мы только растягивали холст пустого пространственно-временного континуума (илл. 41). Общая теория относительности – это геометрическая теория гравитации, поэтому пространственно-временной холст изгибается, если где-либо имеется масса; он также может иметь проколы, разрывы и складки. Холст является трехмерным и не поддается визуализации. Однако это еще не все. Черная дыра в реальной Вселенной окружена излучением, горячим газом, высокоэнергетическими частицами и магнитным полем.



Илл. 41. Численное релятивистское моделирование — область науки, занимающаяся решением уравнений гравитации Эйнштейна методами компьютерного моделирования со сложными и реалистичными астрофизическими установками, если точные решения уравнений невозможны. Одно из требований — умение работать с разными масштабами. В случае двойной системы черных дыр это масштаб от орбиты до горизонта событий. Проиллюстрированный здесь действенный метод называется адаптивной сеткой: выборка пространственно-временного континуума в вычислениях автоматически корректируется согласно силе локальной гравитации. *Коллаборация GRChombo / Национальная лаборатория Лоуренса в Беркли*

Мы рассматриваем три уровня сложности. Первый уровень – сложные взаимодействия частиц и излучения. На втором уровне добавляются магнитные поля. Третий включает гравитацию. В настоящее время ученые исследуют метод релятивистской магнитогидродинамики – верное средство оборвать разговор на любой вечеринке. Если прибегнуть к аналогии с играми, три уровня сложности соотносятся друг с другом, как шашки с шахматами, а те – с японской игрой го. В этом спектре технических возможностей я очень хорош в шашках, кое-что могу в шахматах, но совершенно беспомощен в го. Полный численный анализ ставит целью описать сложную астрофизику не только

черной дыры, но также аккреционного диска и парных джетов[233]. Это мастерский уровень моделирования черных дыр. Менее 100 человек в мире имеют техническую подготовку, необходимую для этой работы.

На компьютерах можно моделировать маленькие черные дыры, но что делать с большими, которые живут в центрах галактик? На этот вопрос ответит Саймон Дэвид Мэнтон Уайт, член Королевского научного общества и директор Института астрофизики Макса Планка в Гархинге. Он творит чудеса с компьютерным моделированием гравитации, поэтому будем звать его Чародеем. У Чародея печальный взгляд, аккуратные усы и седеющая курчавая грива. Он выглядит усталым, но любой устанет, создавая Вселенную с нуля.

Чародей получил степень доктора философии в Кембридже под руководством Дональда Линден-Белла, передового мыслителя и предсказателя черных дыр. На его счету более 400 публикаций в рецензируемых изданиях и свыше 100 000 случаев цитирования – умопомрачительные показатели, возносящие его на недостижимые высоты в данной науке. Это эксперт мирового уровня по свойствам темной материи и формированию структуры Вселенной[234].

Вот как создается Вселенная в компьютере. Задайте трехмерную пространственную сетку. Добавьте нормальную материю и темную материю в нужных пропорциях. Включите гравитацию. Заставьте пространство расширяться согласно модели Большого взрыва и наблюдайте, как будет выкристаллизовываться тонкое кружево крупномасштабных структур из изначально равномерно распределенной массы. Астрономические объекты могут быть представлены огромным числом «частиц». Например, миллион частиц – это скопление звезд, где одна звезда – одна частица, но никакая модель не сможет изобразить галактику по системе одна частица на звезду или Вселенную, где одна частица представляет галактику, поэтому на практике частица представляет собой изменяющееся количество массы[235]. Приведу аналогию. Представьте, что используете миллион частиц для моделирования человеческих популяций. В модели мира каждая частица соответствовала бы 7500 человек, то есть населению большой деревни или маленького сельскохозяйственного района. Дальнейшая детализация была бы невозможна. Однако та же модель может быть чрезвычайно подробной – по частице на человека – для небольшого американского штата, например Род-Айленда, или такого скромных размеров города, как Остин в штате Техас.

С увеличением количества частиц стремительно растут

требования к вычислительной мощности, поэтому Уайт и другие гуру программирования прибегают к хитростям, резко ускоряющим моделирование[236]. В конце концов никто не хочет провести 13,8 млрд в ожидании результата. Модель Уайта называется «Миллениум», потому что это первая мощная модель большого фрагмента Вселенной после 2000 г.

Эти расчеты включают только гравитацию. Однако галактики содержат не только звезды, но и газ, который ведет себя не так, как звезды. Когда сталкиваются две спиральные галактики, звезды и частицы темной материи почти никогда не сливаются – эти компоненты галактик проходят сквозь друг друга. Напротив, газовые составляющие соударяются, нагреваются, ярко светятся и формируют звезды. Газ ведет себя скорее как жидкость, чем как множество частиц. Чтобы работать с газом, модели имитируют его поведение при помощи сглаженных частиц, имеющих вероятностное распределение, а не конкретное местоположение[237]. В них включен и физический слой: уравнения позволяют учесть важные, хоть и мелкомасштабные, детали – например, взрывы сверхновых и формирование черных дыр. Саймон Уайт рассказывает о своем эпохальном космологическом моделировании.

> Новаторством изначального «Миллениума» стал прежде всего общий объем, примерно в десять раз превышающий предыдущие вычисления. А также то, что мы использовали методы, позволившие проследить реальное формирование видимых галактик хотя и приблизительно, но физически обоснованно. Мы смогли предсказать не только распределение невидимого компонента Вселенной – темной материи, но и местоположение видимых объектов и их свойства. … Здесь нас тоже ждали сюрпризы. В частности, пришлось признать, что для понимания свойств видимых галактик мы должны понимать эффекты черных дыр, расположенных в центре. Реальное население галактик определялось развитием черных дыр в их ядрах. Несмотря на то, что черные дыры содержат лишь одну десятую процента звездной массы галактики – ничтожную долю, неверно считать, что этот маленький объект в центре оторван от остальной галактики[238].

Моделирование «Миллениума» было завершено в 2005 г.[239] 10 млрд частиц изображали куб пространства Вселенной со стороной 2 млрд световых лет. (Для хранения результатов потребовалось 25 терабайт.) Это не вся Вселенная, но достаточно

большой фрагмент, который служит «достоверным образцом» и охватывает самые крупные структуры, потенциально формируемые гравитацией за 14 млрд лет. На основе этого моделирования были опубликованы сотни научных статей. Наивысшим достижением на сегодняшний день является модель «Иллюстрис»[240]. Согласно закону Мура, описывающему увеличение вычислительной мощности вследствие уменьшения размера транзисторов, размер лучшей модели удваивается каждые 20 месяцев. К концу 2017 г. модели преодолели барьер в триллион частиц. Благодаря «Иллюстрис» впервые стало возможно реалистичное моделирование существенной части Вселенной вплоть до уровня детализации, позволяющего различить структуру галактики. Теперь компьютер может проследить, как питаются и растут миллионы сверхмассивных черных дыр на протяжении 13 млрд лет.

Как многие теоретики в астрономии, Саймон Уайт изначально получил математическое образование. Он вспоминает, как рассматривал перспективы обучения в магистратуре: «В Кембридже у меня было два варианта. Можно было заняться теоретической механикой жидкостей и газов, аэродинамикой и тому подобным. Эти студенты сидели в здании в центре Кембриджа, в подвальных кабинетах без окон. Другим вариантом была астрофизика. Центр астрофизики находится за пределами города, в здании со множеством окон. Еще там есть деревья, коровы пасутся через дорогу. Я решил, что астрофизика выглядит немного привлекательнее»[241].

Как растут черные дыры и галактики

Судьбы черных дыр и галактик переплетены. Сверхмассивная черная дыра занимает крохотную долю объема галактики и имеет крохотную долю ее массы. Тем не менее, как мы узнали, каждая галактика содержит черную дыру, масса которой тесно связана с массой всех ее звезд. Исходя из этого, что мы можем сказать о совместном росте черных дыр и галактик с течением космического времени?

Славные дни квазаров далеко в прошлом. Мы обнаруживаем сверхмассивные черные дыры, прячущиеся в ближних галактиках, но они по большей части спокойные, как и черная дыра в нашей Галактике. Одна из 100 умеренно активна и одна из миллиона является квазаром. Исследования в оптическом и рентгеновском диапазонах позволяют ретроспективно проследить яркость квазаров. Пик активности квазаров имел место при красном смещении $z = 2 ? 3$, то есть около 11 млрд лет назад, через 2–

3 млрд лет после Большого взрыва. Они были в тысячи раз активнее, чем сейчас. Древнее ночное небо существенно отличалось от нашего. Вселенная была в четыре раза меньше, в ней сливались галактики, где быстро формировались звезды. Сотни галактик были бы видны невооруженным глазом, тогда как сейчас мы можем увидеть лишь три[242], а ближайший квазар находился в 100 раз ближе и был бы виден невооруженным глазом. Благодаря наблюдениям мы можем проследить историю резкого роста активности квазаров, за которым последовал медленный спад.

Все большие галактики имеют сверхмассивные черные дыры, но из этого не следует, что все они проявляют активность квазаров. Откуда нам известно, что активность квазаров эпизодична и не является неотъемлемым свойством определенной группы галактик? Трудно ответить на этот вопрос, потому что астрономы не могут заглянуть в конкретные галактики и отследить их эволюцию. Они проводят исследования, охватывающие большое число галактик всех эпох, и на основе полученных данных составляют «моментальный снимок» активности определенной эпохи.

В последнее десятилетие я занимался исследованиями именно в этой области. Моя цель – понять процессы роста и взаимосвязи черных дыр и галактик. Мне нравятся астрономические исследования – они существенно отличаются от исследований в физике, для которых требуются тысячи сотрудников и инструменты, постройка которых занимает десятилетие. Я все еще могу, вооружившись хорошей идеей и взяв в помощь магистранта, засесть на несколько ночей перед телескопом и этим внести вклад в развитие науки.

Именно поэтому мы с Джонатаном Трампом оказались в предгорьях Анд: смотрели, как темнеет небо над горной цепью, и подготавливали лист наблюдений. Нас интересовал волшебный период роста черных дыр – от 3 до 10 млрд лет после Большого взрыва, когда галактики по большей части завершили слияния, а черные дыры подъели почти все, что смогли. В частности, мы пытались установить нижнюю границу активности ядер галактик. При каком минимальном уровне аккреции черная дыра может светиться как квазар? Мы сумели найти черные дыры в 10 млрд световых лет – спящие, как и черная дыра в центре нашей Галактики. В нашем распоряжении была новая технология – фотопластинкам, которыми я пользовался в Австралии 30 годами раньше, пришел конец. Одна ночь везения – и мы могли не только обнаружить 300 квазаров, но и измерить массы их черных дыр.

Джон был энергичным новичком, а я – убеленным сединами

ветераном, но на деле мы часто менялись ролями. Со временем я не утратил интереса к исследованиям и иногда, поторопившись со сбором данных, допускал серьезные промахи, а Джон обуздывал мои порывы и брал управление телескопом в свои твердые руки. Однажды посреди ночи мы уперлись в облака. Я пытался проявлять терпение. Фотоны проделали путь в миллиарды лет, чтобы попасть в большую линзу нашего телескопа, и несколько лишних часов ничего не решали. Я вышел на улицу и стал смотреть, как расчищается небо. К западу вплоть до Тихого океана громоздились облака. На востоке контур Анд четко вырисовывался на фоне звездного поля. Над головой кондор беззвучно описывал круги.

Мы провели последнюю ночь у телескопа, опустошенные и печальные. На закате нам довелось увидеть зеленый луч. Раз в год получить неделю работы за большим телескопом – большая удача для астронома. Если в эти ночи облачно, придется вернуться в следующем году. Еще один сеанс – и мы с ним расстанемся.

Мы изображали полученные данные точками на диаграммах и ломали головы. У некоторых квазаров были мощные черные дыры, но слабенькое излучение. Другие при крошечных черных дырах ослепительно сияли. Механизм их питания оставался загадкой. За неделю мы насобирали 500 черных дыр, но это была жалкая горстка для Вселенной с сотнями миллиардов галактик, каждая из которых скрывает в себе черную дыру. Казалось, черные дыры беззвучно смеются над нами, тщательно оберегая свои секреты.

Как мы уже узнали, для постоянной яркости уровня квазара достаточно аккреции нескольких солнечных масс в год. Столь скромное потребление предполагает два вывода. Первое: в центральных областях галактик немного газа, и черные дыры редко заглатывают звезды целиком, поэтому топливо истощается менее чем за 100 млн лет. Газ просачивается в галактику из межгалактического пространства, а также добавляется при слиянии галактик, но сейчас, когда Вселенная велика и галактики далеко разнесены, оба процесса неэффективны. Поскольку «топливо» черной дыры расходуется намного быстрее, чем время, необходимое для расцвета и упадка наблюдаемой популяции квазаров, отдельные квазары должны быть «включены» малую часть времени и «выключены» большую часть времени.

Второе: скромные темпы роста черных дыр означают, что они не должны слишком быстро дорастать до огромных размеров. Однако они дорастают! Слоуновский цифровой небесный обзор ищет квазары в пределах первых нескольких миллиардов лет

после Большого взрыва. Старейший квазар, обнаруженный на данный момент, – яркий квазар с красным смещением $z = 7{,}5$. Из этого следует, что сверхмассивные черные дыры в несколько миллиардов солнечных масс сформировались и выросли в течение первого миллиарда лет после Большого взрыва[243]. Это не соответствует медленному, постепенному развитию больших галактик из маленьких путем слияний. Не согласуется это и с пределом роста черной дыры, который 100 лет назад вывел Артур Эддингтон. Невозможно от «семечка» в 10 солнечных масс, что типично для черной дыры, остающейся после смерти массивной звезды, дорасти за миллиард лет до миллиарда солнечных масс. Чтобы возникли древние яркие квазары, нужно было «семечко» в 10 000 масс Солнца.

Недавние расчеты предложили такое объяснение. В первой волне формирования галактик через несколько сотен миллионов лет после Большого взрыва фоновое излучение поначалу препятствовало образованию звезд. Если они все-таки возникали, это был стремительный бурный процесс, оставивший после себя множество маленьких черных дыр, которые в условиях высокой плотности среды сливались в «семена» черных дыр – от 10^4 до 10^6 солнечных масс[244]. Вследствие стремительного скачка черные дыры смогли дорасти за следующие полмиллиарда лет до сверхмассивного уровня (миллиард или больше солнечных масс).

Гипотеза обратной связи увязывает наблюдения воедино. Черная дыра имеет симбиотические отношения с родительской галактикой. Она не может вырасти или зажечься, как квазар, не получая газ из центральных областей галактики. Однако когда она активна, то выделяет так много энергии, что выталкивает газ из центральных областей галактики и подавляет формирование звезд. В активной фазе, продолжительностью 10 млн лет, квазар излучает 10^{53} Дж энергии. Это примерно равно гравитационной энергии, удерживающей звезды на орбитах в большой галактике. Очевидно, энергии квазара хватит, чтобы разрушить галактику. За счет обратной связи квазары отталкивают газ и глушат собственную активность. Обратная связь сводит в единое целое эволюцию внутренней области галактики и черной дыры в ее центре, и это объясняет замеченную астрономами корреляцию между массой черной дыры и массой звезд с гораздо большими масштабами распределения[245].

В общем, в первые нескольких миллиардов лет после Большого взрыва галактики и черные дыры вошли в фазу интенсивного строительства. Под управлением темной материи галактики росли иерархически: мелкие объекты формировались первыми и со временем сливались, образуя более крупные. Темпы

формирования звезд и слияний достигли максимума, после чего стали медленно снижаться по мере сокращения запаса топлива и увеличения Вселенной. Проект строительства черных дыр развивался иначе. Самые глубокие гравитационные потенциалы быстро образовали крупнейшие галактики и самые массивные черные дыры. Сегодня мы наблюдаем их в форме эллиптических галактик, давно истощивших свой газ, с прячущимися в центре мертвыми квазарами. Между тем мелкие гравитационные потенциалы образовали галактики среднего размера – такие как Млечный Путь, которые «вырастили» у себя менее массивные черные дыры, – с более долгим периодом роста и активности[246]. Золотая пора сотворения галактик и черных дыр давно миновала (илл. 42). Когда наступят сумерки Вселенной, будут умирать последние звезды и почти перестанут образовываться новые – им на смену и единственным развлечением станут редкие случаи столкновения двух зрелых галактик и слияния их массивных черных дыр.

Илл. 42. Черные дыры и окружающие их галактики находятся в сложном взаимодействии. Галактики растут иерархически — от малых к большим — путем слияний; растут и их центральные черные дыры — как в ходе слияний, так и поглощая попадающий в них газ. Активность квазара может вызвать истечение газа изнутри наружу, что гасит активность, — это явление называется обратной связью. Наконец, если газ закончился или если обратная связь очень сильна, черная дыра голодает и в центре галактики оказывается мертвый квазар. *П.Ф.Хопкинс / Калифорнийский технологический институт*

Вселенная как черная дыра

Является ли Вселенная черной дырой? Между ними есть некоторые внешние признаки сходства. Масса и радиус наблюдаемой Вселенной удовлетворяют отношению шварцшильдовских массы и радиуса черной дыры. Вселенная имеет горизонт событий, представляющий собой границу между галактиками, которые мы можем видеть, и галактиками, невидимыми для нас, поскольку их свету не хватило времени достичь нас за период существования Вселенной.

Наблюдаются и принципиальные отличия. Самое очевидное: у черной дыры есть внутренности – запечатанное в пределах горизонта событий пространство и время – и внешняя часть. Вселенная по определению есть все пространство и время, так что у нее нет ничего «снаружи». Кроме того, горизонт событий черной дыры является односторонним барьером: хотя никакая информация не может просочиться наружу, мы могли бы пройти сквозь горизонт событий и узнать, что там внутри. В нашей ускоряющейся Вселенной горизонт событий, удаленный на 16 млрд световых лет, отделяет события, которые мы никогда не увидим, сколько бы ни ждали. Мы можем увидеть, что происходило в галактиках перед тем, как они пересекли горизонт событий; все последующее навсегда исчезает от нашего взгляда[247]. Нед Райт, профессор астрономии Калифорнийского университета в Лос-Анджелесе, емко выразил это в своих ответах на часто задаваемые вопросы о космологии: «Большой взрыв на самом деле не имеет ничего общего с черной дырой. Большой взрыв – это сингулярность, распространившаяся на все пространство в одно мгновение времени, а черная дыра – это сингулярность, распространившаяся на все время в одной точке пространства»[248]. Иначе говоря, наша Вселенная в прошлом имела сингулярность, из которой возникло все, а черная дыра имеет сингулярность, в которой объекты могут исчезнуть в будущем.

О черных дырах также вспоминают при попытках объяснить существование Вселенной. Это умозрительная космология, так что пристегните ремни! Теория Большого взрыва опирается на эпизод инфляции, период экспоненциального расширения через 10^{-35} после Большого взрыва, в течение которого Вселенная раздулась от размера меньше протона до примерно метра в поперечнике. Некоторые наблюдения свидетельствуют в пользу инфляции, но до сих пор отсутствует убедительная теория вызвавших ее причин.

В занимательной статье, опубликованной в 2010 г., ученые попытались устранить необходимость в инфляции, распространив теорию гравитации на новый тип элементарных частиц. Теория

обратилась к идее силы отталкивания – так называемой торсионной силы. Торсионная сила при нормальных плотностях и температурах незаметна, но в условиях Большого взрыва она обеспечила бы формирование Вселенной из внутренности черной дыры. В таком случае наша Вселенная являлась бы пространственно-временным континуумом, исторгнутым черной дырой[249]. Побочным преимуществом этой идеи является объяснение стрелы времени. Время для нас течет вперед вследствие асимметричного по времени потока материи на горизонт событий из родительской Вселенной. Это значит, что по другую сторону горизонта событий, в родительской Вселенной, время течет в обратном направлении. Возникает немыслимая ситуация: события, случившиеся после Большого взрыва, в родительской Вселенной развиваются в обратном порядке.

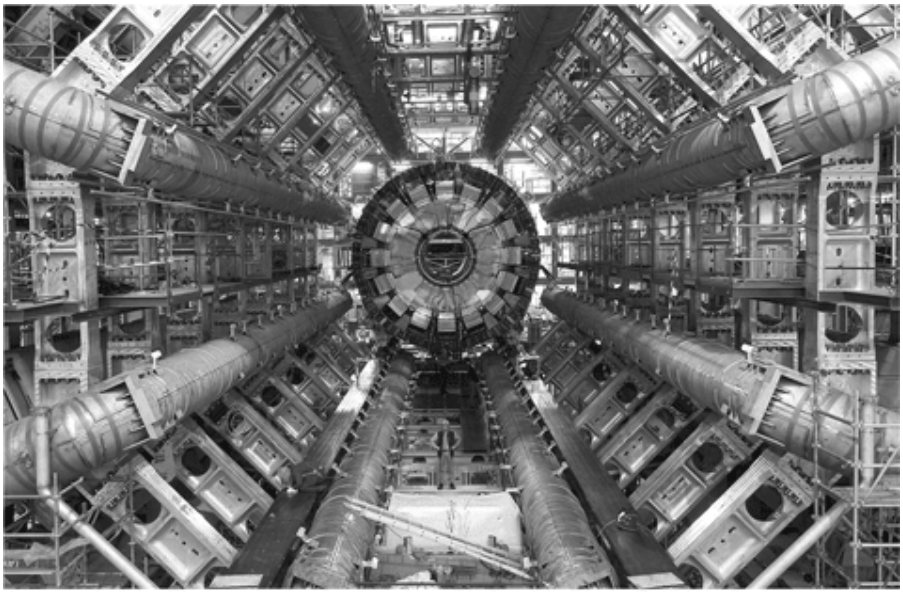
Еще более сумасшедшая теория, опубликованная в 2014 г., воспользовалась инструментарием теории струн. Попытавшись обойтись без сингулярности Большого взрыва, ученые Института теоретической физики «Периметр» в Ватерлоо (Канада) выдвинули теорию, согласно которой наша Вселенная возникла в результате формирования черной дыры во вселенной большей размерности. В нашей трехмерной Вселенной черные дыры имеют двухмерные горизонты событий. В четырехмерной вселенной горизонт событий черной дыры должен иметь три измерения. Ниайеш Афшорди и его коллеги предполагают, что наша Вселенная начала существовать, когда звезда в четырехмерной вселенной коллапсировала в черную дыру. Большой взрыв – мираж, отзвук более многомерного события. Они объясняют это при помощи платоновской аллегории с пещерой: «Двухмерные тени – единственное, что видят пленники, – их единственная реальность. Оковы не позволяют им увидеть настоящий мир, имеющий на одно измерение больше, чем мир, который они знают. ‹…› Узники у Платона не понимают, какие силы управляют Солнцем, как мы не понимаем четырехмерной объемной Вселенной»[250].

Лабораторная черная дыра

Но давайте вместе с черными дырами вернемся на Землю и зададимся вопросом: по силам ли нам создать черную дыру? Прежде чем ответить на него, вспомним, что это за необыкновенный объект – черная дыра. Радиус Шварцшильда пропорционален массе. Чтобы превратить Солнце в черную дыру, его пришлось бы сжать до радиуса 3 км, что соответствует плотности 20 трлн кг на куб. м. Превращение Земли в черную

дыру потребовало бы сжать ее до радиуса 9 мм – это меньше шарика для настольного тенниса. Плотность будет чудовищной – 10^{24} кг/м^3. Для сравнения приведем плотность типичной скальной породы – 2000 кг/м^3. Супермен с его фантастической силой может, стиснув кусок угля, превратить его в алмаз, но плотность при этом увеличивается всего лишь от 900 до 3500 кг на куб. м. Чтобы достичь плотности черной дыры, пришлось бы сжать материю еще в тысячу миллиардов миллиардов раз! Вперед, Супермен!

Создание черных дыр выходит далеко за пределы наших нынешних возможностей. Большой адронный коллайдер (илл. 43) вырабатывает беспрецедентную энергию, но и ее в 10 млн раз меньше, чем нужно для получения черной дыры – даже в теории[251]. Что не помешало СМИ окрестить его «машиной Судного дня» и предположить, что коллайдер породит микроскопические черные дыры, которые провалятся в центр Земли и поглотят нашу планету. Поиск микроскопических черных дыр не дал результатов[252], и всевозможные апокалипсические сценарии были убедительно опровергнуты[253].



Илл. 43. Детектор Atlas Большого адронного коллайдера (БАК) в Швейцарии. Восемь тороидальных магнитов окружают детектор, где при огромных энергиях и на околосветовых скоростях сталкиваются протоны. Хотя БАК мгновенно сжимает материю, таких плотностей не хватит для создания черной дыры, и даже если бы их хватило, получившаяся черная дыра была бы такой маленькой, что испарилась бы за крохотную долю секунды от излучения Хокинга. *М. Брайс / Эксперимент «Атлас» © 2018 ЦЕРН*

Если дополнительные измерения существуют, гравитация в нашей Вселенной может перетекать в другие измерения. Этим объясняется столь слабое гравитационное взаимодействие. Кроме того, поскольку энергия, необходимая для создания микроскопической черной дыры, зависит от количества измерений пространства, создавать микроскопические черные дыры было бы проще. С этой точки зрения факт, что ускоритель частиц не способен сформировать миниатюрные черные дыры, противоречит идее дополнительных измерений. Опять-таки, энергии, позволяющие создавать микроскопические черные дыры и существенно превосходящие возможности Большого адронного коллайдера, наблюдаются каждые несколько месяцев в форме космических лучей, однако нет никаких свидетельств, что космические лучи порождают черные дыры. Наконец, даже если коллайдер создал бы черные дыры, они были бы крохотными – 10^{-23} кг, чтобы дорасти до килограмма, им потребовалось бы поглощать материю в течение 3 трлн лет. Однако, если теория черных дыр верна, их шансы вырасти равны нулю, поскольку они

полностью испарятся за ничтожную долю секунды вследствие излучения Хокинга[254].

Если *в принципе* можно было бы создать миниатюрные черные дыры, они могли бы использоваться в перспективе как транспорт для путешествий к звездам. Идея межзвездных полетов пробуксовывает с самого начала, поскольку наши ракеты летают благодаря химической энергии. Это неэффективное топливо может использоваться для доставки людей на орбиту Земли и грузов в Солнечную систему, но его возможности безнадежно малы для путешествия за триллионы километров даже к ближайшим звездам. Однако энергия, выделяемая микроскопической черной дырой в форме излучения Хокинга, могла бы разогнать космический корабль до скоростей, сопоставимых со скоростью света. Черная дыра, используемая в космических полетах, должна быть довольно маленькой, чтобы ее можно было создать искусственно, иметь массу, аналогичную массе корабля, и достаточно долго жить для полезного применения. Подошла бы черная дыра в полмиллиона тонн. Она имела бы размер 10^{-18} м, выходную мощность 10^{17} Вт, продолжительность жизни 3–4 года и с учетом 10 %-ной эффективности преобразования энергии в кинетическую, разогнала бы космический корабль до 10 % скорости света за 200 дней[255]. Черную дыру разместили бы в точке фокуса параболического отражателя для создания тяги. Такова идея. Дело всего лишь за технической реализацией!

6. Черные дыры как проверка теории гравитации

Законы тяготения Ньютона являются лишь приближением к более глубокому уровню реальности, описанному общей теорией относительности Эйнштейна. При сильной гравитации проявляется необычное поведение искривленного пространственно-временного континуума. Свет отклоняется, часы идут медленнее, при этом на интуицию рассчитывать не приходится. За столетие, прошедшее после первой публикации, теория Эйнштейна триумфально выдержала все проверки, но почти все они подразумевали условия слабой гравитации.

Черная дыра – идеальный испытательный полигон для общей теории относительности. В черной дыре происходят экстремальные искажения пространства и времени. На горизонте событий, согласно предсказанию теории, время должно останавливаться. В фотонной сфере, отстоящей от сингулярности на 50 % дальше горизонта событий, фотоны теоретически должны совершать орбитальное движение наподобие движения спутников вокруг Земли. Настолько сильную гравитацию невозможно создать ни в какой земной лаборатории. Идеально подошла бы достаточно близкая к Земле черная дыра, но до ближайших черных дыр звездной массы – сотни световых лет, а до сверхмассивных – миллионы. Астрономам приходится использовать далекие черные дыры и изобретать эксперименты, позволяющие по-новому протестировать теорию гравитации.

Гравитация от Ньютона до Эйнштейна и далее

Черные дыры можно понять только с помощью теории гравитации Эйнштейна, но необходимость в новой теории гравитации возникла не из-за них. История началась в Англии в 1665 г. К 33 годам Исаак Ньютон так и не стал фермером, и мать отправила его учиться в Кембридж. Университет был закрыт из-за чумы, Ньютону пришлось оставаться дома, где он размышлял о тяготении. Раскручивая камень, привязанный к бечевке, он заметил, что камень пытается улететь прочь от центра вращения, но бечевка создает силу противодействия. Какая сила противодействия удерживает Луну на орбите Земли и планеты на орбитах Солнца? К 1687 г. он вывел ответ: сила уменьшается обратно пропорционально квадрату расстояния. Ньютон подробно описал теорию гравитации в своем главном труде

«Математические начала».

Скоро астрономы стали использовать этот закон для все более точных предсказаний – например, они рассчитали, что комета, носящая ныне имя Эдмунда Галлея, вернется в апреле 1759 г. Так и произошло, что окончательно укрепило репутацию Ньютона. Столетие спустя французский астроном Урбен Жан Жозеф Леверье решал проблему аномалии орбиты Урана – первой новой планеты, открытой с античных времен. Ученый пришел к выводу, что возмущения в орбиту вносит некое внешнее по отношению к ней тело, и предсказал его массу и местонахождение. Почти сразу после этого в Берлинской обсерватории открыли Нептун. Предсказательная сила теории Ньютона казалась безграничной[256].

Однако в этом чистом голубом небе висело маленькое облачко – орбита Меркурия. Меркурий имеет очень вытянутую орбиту, ближайшая к Солнцу точка которой – перигелий – смещается для земного наблюдателя на 5600 угловых секунд (около полутора диаметров Луны) за столетие. Самые точные расчеты Леверье показали, что известные планеты и закон Ньютона объясняют только прецессию в 5557 угловых секунд. Уверенность в теории Ньютона была так велика, что для объяснения этого крохотного расхождения было постулировано наличие внутри орбиты Меркурия не открытой пока планеты, названной Вулканом[257]. Леверье до самой смерти верил, что Вулкан будет найден, но этого не произошло. В действительности же теория Ньютона оказалась не столь совершенной.

В 1907 г. миновало всего два года после «чудесного года», когда Эйнштейн переосмыслил физику, но он и не думал о попытках «улучшить» закон тяготения Ньютона. Эйнштейн работал в патентном бюро в Берне и имел много свободного времени. Тогда его и озарила «счастливейшая мысль»: в состоянии свободного падения человек не будет ощущать своего веса. Это навело его на совершенно новые представления о гравитации.

Прошло восемь лет, и Эйнштейн пребывал в смятении. Он в одиночку проделал большую часть работы. Научные круги запоздало приняли его, и он стал профессором физики в Праге, но ситуация была непростой: в Европе усиливался антисемитизм, и Эйнштейн ощущал это на себе. Возможно, трудно поверить, но у него возникли сложности с математической составляющей общей теории относительности. Лучше всего Эйнштейну работалось, когда он следовал своему выдающемуся чутью физика. Годами он продумывал разные варианты своей теории, но то и дело возникали ошибки и недочеты. Летом 1915 г. Эйнштейн выступил

с циклом лекций о принципе относительности в Гёттингенском университете, а в ноябре того же года совершил переворот в науке, о котором рассказал на своей четвертой лекции – под названием «Уравнения гравитационного поля» – в Прусской академии наук. Объяснение аномального смещения орбиты Меркурия стало решающей проверкой этих уравнений. Теория предсказывала эффект в 43 угловые секунды за столетие – именно настолько расходились практические наблюдения с предсказанием теории Ньютона. «На протяжении многих дней я был сам не свой от радости и воодушевления, – рассказывал Эйнштейн коллеге. – Я весьма удовлетворен результатами по движению перигелия Меркурия. Какой полезной для нас оказалась педантичная точность астрономии, над которой я привык втайне посмеиваться!»[258]

В теории Ньютона источником гравитации является масса. В теории Эйнштейна масса – часть более общего параметра, так называемого тензора энергии-импульса. Тензор можно понимать как своеобразную форму вектора, включающего информацию о физической величине в любой точке пространства. Масса в общей теории относительности определяется в искривленном пространственно-временном континууме и имеет энергию и импульс в каждом из трех измерений, поэтому для описания отношения массы и пространственно-временного континуума теории Эйнштейна требуется десять уравнений. Вот и все, что мы можем сказать, если не собираемся вместе с Безумным Шляпником прыгнуть в кроличью нору системы дифференциальных уравнений в частных производных второго порядка.

Общая теория относительности была лишь одной из фундаментальных физических теорий начала XX в. Другой была квантовая механика, объясняющая поведение атомов и субатомных частиц. Эти две теории большого и малого несовместимы. Теория относительности является «однородной», поскольку события и пространство непрерывны и детерминированы. Все происходящее имеет выявляемую локальную причину. Квантовая механика «зерниста»: события происходят дискретно, квантовыми скачками, а результаты носят вероятностный, а не однозначный характер. Самым поразительным примером несогласованности теорий является квантовая запутанность, в которой свойства частиц могут влиять друг на друга мгновенно на огромных расстояниях[259]. Эйнштейн называл это «пугающим дальнодействием» и был убежден, что имеется более основательная теория природы, которая снимет парадоксальность квантовой механики.

Его работа в этом направлении завершилась неудачей. Несмотря на множество попыток, Эйнштейн не смог найти ни фатальные ошибки, ни хотя бы существенные упущения квантовой теории. Он пытался обобщить свою геометрическую теорию гравитации и включить в нее электромагнетизм, но исследования, которыми ученый был вынужден заниматься в одиночестве, привели лишь к дальнейшим разочарованиям. Эйнштейн умер в Принстоне в 1955 г., на его доске остался список нерешенных вопросов.

Следующие поколения физиков удостоились чести, а может быть – взяли на себя бремя поисков согласования двух великих теорий. Конечной целью является «теория всего», объясняющая все физические явления. В природе имеется четыре фундаментальные силы. Две действуют на субатомном уровне: сильное и слабое ядерные взаимодействия. Другие две – на очень больших расстояниях: электромагнетизм и гравитация. Физики частично сумели объединить эти силы во второй половине XX в. Эксперименты на ускорителях в 1970-е гг. показали, что электромагнетизм и слабое взаимодействие, обусловливающее радиоактивность, являются проявлениями одной электрослабой силы. Благодаря дополнительным экспериментам почти удалось увязать с остальным и сильное ядерное взаимодействие. Эта конструкция называется Стандартной моделью физики частиц[260]. Однако гравитация упрямо сопротивляется включению в эту модель. Никто никогда не видел гравитон – гипотетической частицы-носителя силы гравитации. Унификация, включающая гравитацию, возможна лишь при фантастической температуре 10^{32} кельвинов (илл. 44). Единственная известная нам ситуация с такой температурой – 10^{-43} секунд после Большого взрыва, когда Вселенная была размером с элементарную частицу и общий принцип относительности разбивался о начальную сингулярность и сгорал в ней.

Существуют разные подходы к решению вопроса квантовой гравитации[261]. Идея петлевой квантовой гравитации основывается на рассуждениях Пифагора, который представлял, что берет от камня половину, от полученного куска – еще половину – и так до тех пор, пока не достигнет предела. В данном случае дюйм делится пополам – и так далее, вплоть до «атомов», или неделимых единиц пространства. Петлевая квантовая гравитация – это попытка напрямую перенести логику квантовой механики на силу гравитации. К более радикальным подходам относятся теория струн и дополнительные пространственные измерения, помимо известных трех. Переход от Ньютона к Эйнштейну и далее – от жесткого и линейного к гибкому и

искривленному, а затем к туманному и дискретному – это самый важный незавершенный проект в физике. Прогресс идет медленно, а работа невероятно трудна.

Илл. 44. К четырем фундаментальным силам природы относятся две с бесконечным радиусом действия — гравитация и электромагнетизм — и две субатомного уровня — сильное и слабое ядерные взаимодействия. Они значительно различаются своими возможностями, но имеется свидетельство, что при экстремально высоких энергиях они объединяются в «суперсилу». Объединение слабой и электромагнитной сил наблюдалось в ускорителях в 1970-х гг., и имеются признаки возможного «великого объединения» с сильным взаимодействием. *ЦЕРН / Коллаборация CMS*

В главе 1 мы увидели, что черные дыры характеризуются не только экстремальной гравитацией – для них также важны квантовые эффекты. Для любой новой теории, согласовывающей «однородный» мир искривленного пространственно-временного континуума с «зернистым» миром субатомных частиц, черные дыры оказываются самой сложной проблемой.

Эйнштейн однажды сказал, что только две вещи могут быть бесконечными: Вселенная и человеческая глупость. Насчет Вселенной он сомневался[262]. Умнейшие люди планеты пытаются создать теорию квантовой гравитации. Возможно, они преуспеют, возможно, нет. Тем временем испытания и попытки опровержения общей теории относительности могут способствовать прогрессу. По словам другого великого физика, Ричарда Фейнмана: «Мы стараемся как можно быстрее доказать свою неправоту, поскольку только так можем двигаться вперед»[263].

Как черные дыры влияют на пространство-время

Черную дыру можно определить как область пространственно-временного континуума, искривленную настолько, что она «выдавлена» из остальной Вселенной. И даже на некотором расстоянии от черной дыры искривление пространственно-временного континуума будет отклонять частицы и свет. О черных дырах еще не знали в тот момент, когда Эйнштейн создал общую теорию относительности, поэтому ее проверяли по гораздо более слабому эффекту – легкому отклонению света далекой звезды, проходящему у края Солнца по пути к Земле. Этот эффект проще всего наблюдать во время солнечного затмения, когда Солнце закрывается Луной и фоновые звезды становятся видимыми[264]. В 1919 г., всего через три года после выхода статьи об общей теории относительности, Артур Эддингтон и другие ученые измерили это отклонение одновременно в Бразилии и Центральной Африке. Результаты совпали с предсказанием Эйнштейна[265].

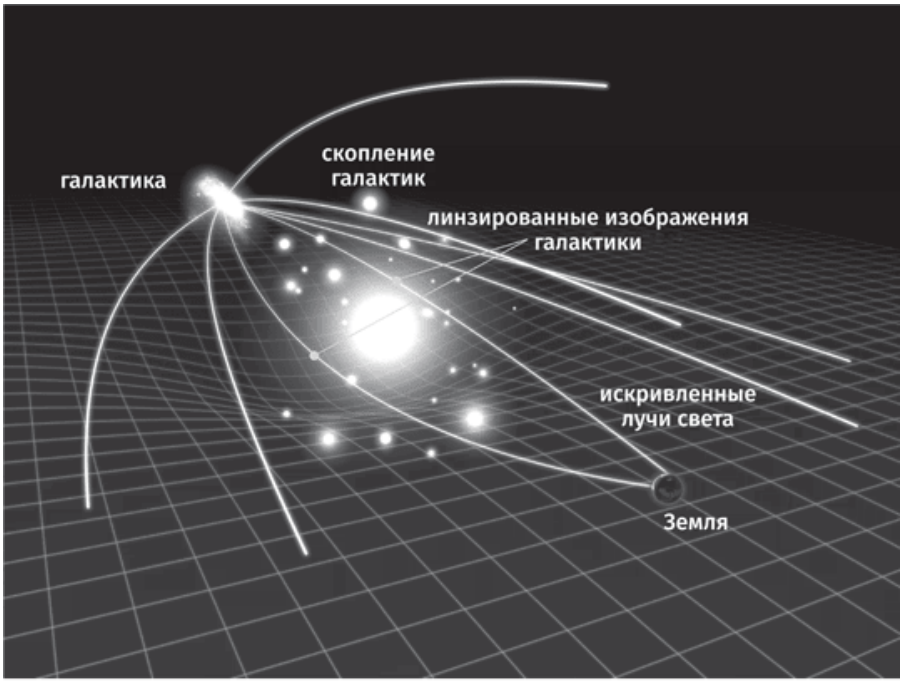
Эксперимент попал на передовицы большинства газет. Безусловно, драматизму ситуации способствовала ее символичность: британский ученый подтверждает работу немецкого ученого в конце длинной кровопролитной войны. Эйнштейн проснулся знаменитым. Он был абсолютно уверен в результатах. На вопрос, что бы он почувствовал, если бы экспедиция Эддингтона не подтвердила общую теорию относительности, он ответил: «Мне было бы жаль Господа. Теория в любом случае верна»[266].

Масса отклоняет свет. Этот факт был исключительно важен для теории и репутации Эйнштейна, и удивительно, что ученый не торопился признавать его более широкие последствия. Он знал, что если лучи света проходят вблизи достаточно массивного тела, то могут отклониться так сильно, что сойдутся и дадут увеличенное или множественное изображение фонового источника. Поскольку этот процесс напоминает отклонение света линзой, ученые назвали его гравитационным линзированием. По настоянию коллеги-инженера Эйнштейн в 1936 г. наконец опубликовал статью по линзированию с удивительно осторожным предисловием: «Некоторое время назад Р. У. Мандл нанес мне визит и предложил обнародовать результаты небольших вычислений, проделанных по его настоянию. Выполняя его просьбу, я публикую это сообщение»[267]. Он послал самоуничижительную записку редактору журнала: «Позвольте также поблагодарить вас за помощь с этой статейкой, которую мистер Мандл из меня выдавил. Ценности она почти не

представляет, но бедняга счастлив»[268].

Эйнштейн фатально заблуждался по поводу ценности гравитационного линзирования. Это один из важнейших инструментов современной астрофизики. Он используется для картирования темной материи в галактиках и во всей Вселенной, выделения темной энергии, исследования коричневых и белых карликов и обнаружения экзопланет меньше Земли (илл. 45).

Эйнштейн считал, что эффект линзирования слишком слаб и его невозможно измерить, но через считаные месяцы после появления этой статьи астроном Калтеха Фриц Цвикки понял, что миллиарды звезд, объединенные в галактики, могут вызывать линзирование, доступное для наблюдения. В своей пророческой статье он описал практически все современные виды использования гравитационного линзирования[269]. Однако только в 1979 г. – через 40 с лишним лет – линзирование стали наблюдать. Инструментом послужила сверхмассивная черная дыра, удаленная на миллиарды световых лет.



Илл. 45. Согласно общей теории относительности, масса отклоняет свет. Если массивный объект — например, скопление галактик — находится между нами и более далекой галактикой, пространственно-временной континуум искривляется и свет далекой галактики огибает скопление. Это приводит к появлению искаженных и увеличенных изображений. Поскольку линзирование вызывает любая масса, а не только видимая материя, оно позволяет оценить количество темной материи во Вселенной. *Л. Калкада / NASA / ЕКА*

Группа ученых под руководством британского радиоастронома Денниса Уолша, используя 2,1-метровый телескоп обсерватории Китт-Пик, обнаружила два квазара с одинаковыми спектрами. Шансы найти два квазара с одинаковыми спектрами, находящихся так близко в небе, были очень малы – настолько малы, что по пути в Китт-Пик Уолш написал на доске своего коллеги Дерека Уилла условия пари: «Нуль квазаров: я плачу Дереку 25 центов. Один квазар: он платит мне 25 центов. Два квазара: он платит мне доллар». Уолш вспоминал: «Когда я позвонил Дереку на следующее утро и рассказал о нашей находке, он засмеялся, и я сказал: “Ты должен мне доллар. Если бы я поставил сто долларов на два квазара с одним и тем же красным смещением, ты бы принял пари?” Он ответил: “Конечно”. Так я потерял 99 долларов и сохранил друга. ‹…› У меня было четверо сыновей-подростков, никто из них не

проявлял особого интереса к науке. Теперь на их вопрос: “Ну, и кому оно нужно, это гравитационное линзирование?” – я мог ответить, что я на нем заработал»[270].

Квазары выглядели как близнецы, но оказались миражом, а не двумя квазизвездными объектами, по случайному совпадению имеющими одинаковые спектры. Свет одного квазара двумя разными путями огибал находящуюся на линии наблюдения галактику, давая два изображения. Массивная галактика отклоняет свет очень слабо, всего на одну тысячную градуса. К этой первой гравитационной линзе свет идет 8,7 млрд лет, но чуть больше одного светового года у него уходит на то, чтобы обойти галактику с одной стороны – в сравнении с другой. Поскольку свет квазара имеет переменную яркость, имеется временная задержка в год с небольшим в изменениях, наблюдаемых в одном и другом изображениях. Это было использовано при хитроумном измерении скорости расширения Вселенной[271].

Гравитационное линзирование встречается редко, поскольку требует, чтобы фоновый квазар и галактика переднего плана находились почти точно на одной линии. При многих тысячах изученных квазаров обнаружено менее ста случаев линзирования. В дюжине из них совпадение идеально, и вместо нескольких изображений находящаяся на луче зрения галактика превращает точечный источник света, квазар, в эйнштейново кольцо[272] – наглядную демонстрацию общего принципа относительности в действии. В зависимости от геометрии свет, порождаемый энергией аккреции вблизи сверхмассивной черной дыры, предстает в виде дуги, множественных изображений или идеального кольца.

В 1990-х гг., когда начал работу космический телескоп «Хаббл», была открыта другая ситуация линзирования: не свет единичного квазара распадался на несколько изображений, а свет множества далеких галактик на луче зрения линзировался галактическим скоплением. Иногда формируются множественные изображения, но чаще свет фоновой галактики деформируется в дугу. Отличительным признаком этого типа линзирования является скопление, окруженное маленькими дугами, собранными в концентрические круги вокруг центра скопления (илл. 46). Каждое искаженное изображение – это эксперимент в области гравитационной оптики. Такие дуги были замечены у нескольких сотен скоплений – таким образом, астрономы накопили десятки тысяч примеров отклонения света массой[273].

Илл. 46. Гравитационное линзирование скоплением галактик предсказал Фриц Цвикки в 1937 г., но впервые оно наблюдалось лишь в 1990-х гг., когда астрономы получили возможность делать резкие изображения при помощи космического телескопа «Хаббл». На этом изображении видно, как скопление галактик Абель 2218 вызывает искажение и увеличение множества более далеких галактик. Дуги вследствие линзирования образуют концентрические круги вокруг центра масс скопления. В некоторых ситуациях линзирования одна далекая галактика может давать пять или семь отдельных изображений. *У. Кауч, Р. Эллис / NASA / ЕКА*

Любая масса отклоняет свет, будь она видимой или невидимой, поэтому линзирование – это лучший инструмент астрономов для картирования темной материи в галактиках, их скоплениях и межгалактическом пространстве. Линзирование дает самое убедительное свидетельство того, что темная материя существует и является преобладающим и повсеместно распространенным компонентом Вселенной.

Как черные дыры влияют на излучение

Горизонт событий черной дыры – это место, где останавливается время и замирает излучение. Таково положение специальной теории относительности Эйнштейна: свет имеет универсальную и постоянную скорость 300 000 км/с. Свет, покидающий черную дыру, встречается со столь сильной гравитацией, что теряет скорость и энергию. Этот эффект называется гравитационным красным смещением. Горизонт событий черной дыры соответствует месту с бесконечным красным смещением, и свет оказывается в ловушке.

Раз мы не можем экспериментально проверить теорию на

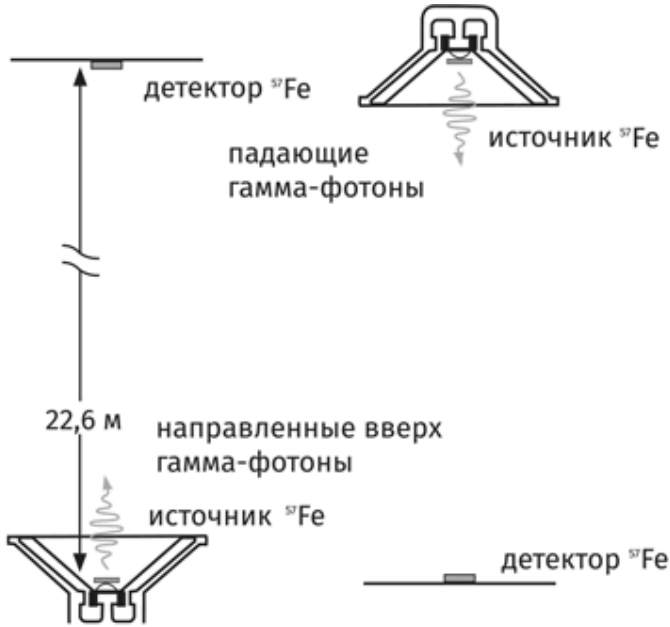
черной дыре, откуда мы узнаем о влиянии гравитации на излучение? Давайте поставим мысленный эксперимент на Земле. Представим, что выпускаем фотон с вершины башни к основанию, превращаем его энергию в массу (согласно формуле $E = mc^2$), роняем массу к подножию башни и превращаем ее обратно в фотон. Казалось бы, все очевидно, но не торопитесь! Когда мы роняем массу, она набирает скорость и приобретает гравитационную энергию. Энергия вычисляется по формуле mgh, где m – масса, g – ускорение вследствие гравитации Земли, а h – высота башни. Когда мы превращаем массу обратно в фотон, он имеет бо?льшую энергию. Мы можем повторять это действие многократно, создавать энергию и богатеть! Но никто пока не заработал на цикличном подбрасывании света, и значит, в рассуждении кроется ошибка. Единственная возможность сохранить энергию в этом сценарии – иными словами, сделать так, чтобы она не изменилась, – предположить, что свет находится под влиянием гравитации, то есть теряет энергию, когда поднимается с поверхности Земли на вершину башни. Потеря энергии означает, что свет смещается к более длинным – или красным – волнам. Это и есть гравитационное красное смещение.

Представим себе часы, в которых время измеряется частотой света. Поместим часы к подножию башни. Глядя на них с вершины, мы понимаем, что фотоны, направляясь к нам, теряют энергию, следовательно, частота снижается. Мы видим, что часы идут медленнее. Наоборот, если мы стоим у подножия башни и смотрим вверх, то видим, что часы на вершине идут чуть быстрее. Замедление времени в условиях сильной гравитации – еще одно предсказание общей теории относительности. Удивительным примером является приписываемое физику Ричарду Фейнману предсказание: центр Земли на два с половиной года моложе ее поверхности[274]. Это явление называется гравитационным замедлением времени. Красное смещение и замедление времени тесно связаны. Свет и другие формы электромагнитного излучения имеют длину волны, обратно пропорциональную частоте. Поскольку энергия света уменьшается, когда он борется с гравитацией, его волны становятся более длинными – или более красными, а частота снижается – иными словами, световые «часы» идут медленнее[275].

Первым гравитационное красное смещение наблюдал Уолтер Адамс в 1925 г. Он измерил смещение спектральных линий ближнего белого карлика Сириус B. Поскольку Сириус B входит в двойную систему, его масса известна, а смещение составляет несколько десятитысячных, а не несколько миллионных долей,

как в случае менее компактной звезды – например, Солнца. К сожалению, измерения были искажены световым загрязнением намного более яркого партнера – Сириуса A, и ученые не признали эффект подтвержденным.

Первым лабораторным тестом общей теории относительности стал эксперимент Роберта Паунда и его аспиранта Глена Ребки в 1959 г. Они измерили спектральный сдвиг гамма-излучения радиоактивного железа, поднятого на 22,5-метровую башню в кампусе Гарварда. Ничтожная потеря энергии – менее трех долей из 10^{15} – подтвердила предсказание общей теории относительности с точностью 10 % (илл. 47)[276]. Эксперимент был усовершенствован, когда для проверки влияния гравитации использовали атомные часы. В 1971 г. цезиевые атомные часы, которые были взяты в полет на большой высоте на гражданском реактивном самолете, ушли вперед на 273 наносекунды в сравнении с такими же часами в Вашингтонской военно-морской обсерватории[277], а в 1980 г. в ходе еще более точного теста с лазерными часами, находившимися в летящей ракете, соответствие теории увеличилось до 0,007 %[278]. Сегодняшние продвинутые технологии позволяют измерять квантовую интерференцию атомов. Общая теория относительности подтверждается с феноменальной точностью – менее одной миллионной доли процента[279]. Мы можем доказать, что часы действительно идут быстрее, если поднять их меньше чем на метр!



Илл. 47. Первой экспериментальной проверкой общей теории относительности стал проведенный в 1959 г. самый точный на тот момент физический эксперимент. Гарвардские физики Роберт Паунд и Глен Ребка измерили энергию гамма-излучения вследствие радиоактивного распада железа-57, перемещаемого вверх и вниз на расстоянии 22,5 м. Фотон, двигавшийся сверху вниз, имел голубое смещение, а фотон, двигавшийся снизу вверх, — красное, и величина смещения в точности соответствовала предсказанию теории. Точность, необходимая для этого теста, составляла несколько долей 10^{15}. *Р. Нейв / Hyperphysics*

Астрономы не остались в стороне. Скопления галактик являются самыми массивными объектами во Вселенной. Фотоны из центра скопления с большим количеством галактик должны терять больше энергии, чем фотоны с окраины, где галактик меньше. Группа под руководством Радека Войтака из Института Нильса Бора искала этот эффект – настолько слабый, что для его обнаружения пришлось объединить данные 8000 скоплений[280]. Теория Эйнштейна снова подтвердилась.

На хороший умозрительный эксперимент люди обычно реагируют словами: «Ну конечно, это же очевидно!» Вспомним отзыв английского биолога Томаса Гексли на теорию естественного отбора Дарвина: «Какая невероятная глупость не подумать об этом!»[281] Мысленные эксперименты Эйнштейна с лифтами раскрыли красоту общей теории относительности. Свободное падение лифта в направлении Земли аналогично

ситуации парения лифта в открытом космосе ввиду отсутствия силы гравитации. Лифт, разогнанный в космосе до 9,8 м/с, аналогичен лифту, стоящему на Земле, потому что ускорение, создаваемое гравитацией, невозможно отличить от ускорения, созданного любой другой силой. Во втором случае представьте, что светите прожектором через лифт. За крохотный промежуток времени, необходимый свету, чтобы достичь противоположной стороны кабины, лифт ускоряется, и свет двигается через него по нисходящему криволинейному пути. Согласно теории Эйнштейна, то же самое должно происходить с неподвижным лифтом на земной поверхности. Свет «падает» из-за гравитации. То есть в терминах теории относительности масса Земли искривляет пространство, и свет немного отклоняется, следуя возле Земли искривленному пространственно-временному континууму.

Мы описали «классические» проверки общей теории относительности. Они используют ситуации с настолько слабой гравитацией, что искривление пространственно-временного континуума и искажение – малы, и потому требуются исключительно точные измерения. Около 50 лет назад Ирвин Шапиро, долгое время возглавлявший Гарвард-Смитсоновский центр астрофизики, предложил оригинальный способ проверки теории в условиях слабой гравитации. Он понял: если путь фотонов лежит мимо Солнца, то во времени прохождения сигналов радара, отражающихся от других планет, до цели и обратно должна быть маленькая задержка. Измерив сигналы радара, отраженные от Меркурия и Венеры, до и после того, как их заслонило Солнце, он подтвердил общую теорию относительности на уровне 5 %[282]. Этот эксперимент был повторен во внешней Солнечной системе зондом NASA «Кассини» с соответствием 0,002 %[283].

Эти тесты подтверждают общую теорию относительности и ее превосходство над теорией Ньютона. Однако проверка теории относительности там, где пространство плоско, как кукурузные поля Айовы, оставило ощущение легкой неудовлетворенности. Это сродни тест-драйву «Ламборджини» на парковке. Разумеется, он поедет лучше вашего старого «Форда Таурус», но это явное занижение планки. Гораздо лучше промчаться за рулем по горной трассе: вы почувствуете, как резво «Ламборджини» штурмует склоны и вписывается в повороты, а «Таурус» перегреется и съедет на обочину. Астрономы надеются когда-нибудь проверить эту теорию на настоящих черных дырах: излучение обещает быть зрелищным. Из следующего раздела мы узнаем, как спектроскопия аккреционного диска позволила обнаружить

сильное гравитационное красное смещение.

По ту сторону железного занавеса

Область вокруг черной дыры – подходящее место для решающей проверки общей теории относительности. Какое расстояние будет максимально близким для наблюдений? Предел устанавливает горизонт событий, через который к нам не проходит никакая информация. Общая теория относительности также описывает несколько важных рубежей вне горизонта событий. Первый – так называемая фотонная сфера, где свет попадает в ловушку и начинает двигаться по круговым орбитам вокруг черной дыры. Поскольку масса отклоняет свет, можно представить массу, загнувшую свет в кольцо. Попади вы туда, фотон, начав путь от вашего затылка, обогнул бы черную дыру по орбите и достиг бы вашего глаза, и вы увидели бы собственный затылок. У неподвижной черной дыры радиус фотонной сферы в полтора раза больше радиуса Шварцшильда[284]. Вращающаяся черная дыра имеет две фотонные сферы и по мере своего вращения утягивает за собой пространство. Внутренняя фотонная сфера движется в направлении вращения, а внешняя – в противоположную сторону. Представьте себе пловца, пытающегося вырваться из водоворота. Для этого нужно плыть против течения – плывя по течению, он лишь приблизит печальную судьбу. Наблюдать фотонную сферу невозможно, поскольку фотоны пойманы в ловушку.

Мы входим в сферу наблюдений, оказавшись у внутреннего края аккреционного диска. Увлекаемые гравитацией к черной дыре, частицы трутся друг о друга, повышая температуру вещества, поэтому аккреционный диск представляет собой плазму, температура которой понижается по мере удаления от центра диска. Внутренний край определяется самой внутренней устойчивой орбитой, радиус которой в три раза больше радиуса Шварцшильда для неподвижной черной дыры и чуть выступает за горизонт событий у черной дыры, быстро вращающейся вокруг своей оси[285]. Частица, оказавшаяся внутри устойчивой орбиты, втягивается в черную дыру и исчезает навсегда. Внутренняя кромка аккреционного диска черной дыры малой массы имеет температуру 10 млн кельвинов, а сверхмассивной – 100 000 кельвинов. Такой горячий газ дает мощное рентгеновское излучение.

Можем ли мы увидеть внутреннюю кромку аккреционного диска? Нет. Угловой размер слишком мал для любого телескопа. У ближней черной дыры – на расстоянии 100 световых лет –

внутренняя кромка образует угол 10^{-9} угловых секунд. Это как если пытаться рассмотреть булавочную головку на поверхности Марса. Ситуация немного лучше в случае со сверхмассивными черными дырами – например, с неактивными, обнаруженными в центре ближних галактик. Они в несколько миллионов раз дальше, но их горизонт событий в миллиард раз больше, поэтому внутренние радиусы их аккреционных дисков видны под углами от 10^{-7} до 10^{-6} угловых секунд. Это в несколько сотен раз меньше разрешения даже описанных выше радиоинтерферометров, следовательно, все еще недоступно для наблюдательной астрономии.

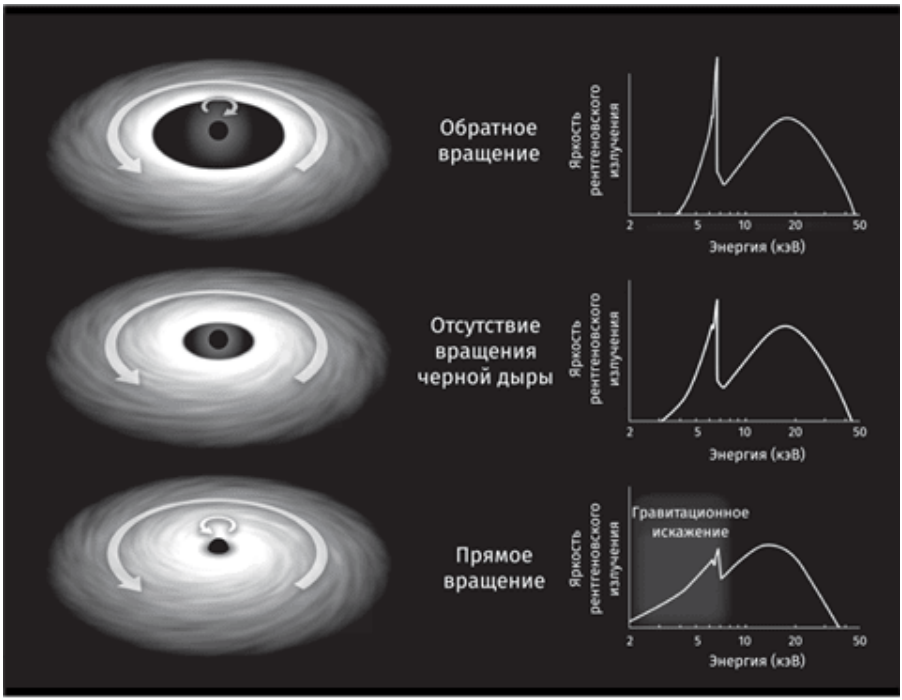
У астрономов есть только одна возможность заглянуть за железный занавес – спектроскопия. Газ аккреционного диска почти полностью состоит из ионов водорода и гелия, но две из каждого миллиона частиц являются ионами железа. Область сразу за аккреционным диском – это экстремально горячая корона. Рентгеновские лучи короны облучают несколько более прохладный аккреционный диск, а их энергия вызывает спектральные переходы железа. Железо – редкий элемент, но его спектральные характеристики – четкие и однозначные. Рентгеновский спектр показывает движение газа, потому что приближающаяся к нам часть аккреционного диска имеет голубое смещение, а удаляющаяся от нас – красное. Рентгеновские лучи внутренней части аккреционного диска также подвергаются сильному гравитационному красному смещению, поэтому спектральная линия железа расширяется и сдвигается в область низких энергий (илл. 48). Рентгеновское излучение дает замечательную возможность измерить гравитацию в пределах крохотного горизонта событий[286].

Эти наблюдения стали возможны благодаря запуску рентгеновского спутника ASCA в 1993 г. Впервые рентгеновские лучи внутренней кромки аккреционного диска массивной черной дыры удалось зарегистрировать на следующий год[287]. Гравитационное красное смещение линий рентгеновского спектра уже наблюдалось у десятка черных дыр звездной массы и аналогичного числа сверхмассивных черных дыр. Удивительный феномен в рентгеновском диапазоне, обнаруженный несколькими годами ранее, позволил открыть второе окно наблюдения за областями черных дыр.

Рентгеновское мерцание на краю бездны

В 1980-х гг. рентгеновские спутники начали мониторинг компактных звезд и звездных остатков и обнаружили быстро

изменяющиеся источники рентгеновского излучения. Мерцание не было ритмичным, и явление назвали квазипериодическими осцилляциями. Впервые они наблюдались у белых карликов, затем у нейтронных звезд и черных дыр.



Илл. 48. Спектральную линию железа можно использовать для изучения очень горячей внутренней области аккреционного диска вокруг черной дыры. Вследствие влияния черной дыры гравитационное красное смещение сдвигает линию в область низкой энергии. Внутренний край находится дальше от черной дыры, если она вращается в противоположном направлении относительно аккреционного диска (обратное вращение), и ближе, если она вращается в том же направлении, что и аккреционный диск (прямое вращение). Эти различия видны в рентгеновском диапазоне. *NASA / Лаборатория реактивного движения / Калифорнийский технологический институт*

Астрономы не сразу поняли, какие астрофизические процессы лежат за этими изменениями. Временная шкала у разных источников составляла от секунды до всего лишь миллисекунды, а периодичность часто терялась в шуме более хаотических колебаний. У черных дыр наблюдался специфический рисунок нарастания и снижения яркости: сначала 10 секунд для завершения осцилляции, затем через несколько недель или

месяцев – ускорение до десятой доли секунды, далее изменения прекращались, и цикл повторялся. Наблюдения и моделирование архетипичной черной дыры Лебедь X-1 выявили источник колебаний. Это пульсации, вызванные газом, покидающим внутреннюю область аккреционного диска и увлекаемым к горизонту событий. Волнительно наблюдать в реальном времени за предсмертными конвульсиями материи, падающей в черную дыру[288].

Астрономы подозревали, что от массы черной дыры может зависеть частота изменений. Газ движется внутрь по спирали в аккреционный диск, ускоряясь, и скапливается у черной дыры, испуская мощное рентгеновское излучение. У маленьких черных дыр эта область затора находится близко, и «рентгеновские часы» тикают быстро. У больших дыр эта область дальше, поэтому ход «рентгеновских часов» медленнее. Данная зависимость настолько устойчива, что изменение яркости рентгеновского излучения используется для измерения массы черных дыр[289], в том числе самой маленькой из известных нам. При поперечнике 24 км и массе 3,8 солнечных она лишь чуть превышает критическую массу нейтронной звезды.

Недавно группа Адама Ингрmaма из Амстердамского университета объединила данные об изменении яркости рентгеновского излучения и о форме спектральной линии железа. Ингрaм, занявшийся квазипериодическими осцилляциями в ходе работы над диссертацией в 2009 г., говорит: «Сразу стало ясно, что это нечто примечательное, поскольку происходит в области, очень близкой к черной дыре». Пользуясь данными двух рентгеновских спутников, его группа доказала, что вещество на орбите вокруг черной дыры попало в гравитационный «водоворот», созданный черной дырой: «Представьте, что вращаете ложку в меду. Мед – это пространство, и все, что в нем находится, будет “увлечено” в круговое движение вслед за вращающейся ложкой». Ученые выбрали черную дыру с периодом колебаний 4 секунды и внимательно наблюдали за ней почти три месяца. Линия железа вела себя именно так, как предсказывала общая теория относительности. «Мы измеряем непосредственно движение материи в сильном гравитационном поле возле черной дыры», – сказал Ингрaм[290]. На сегодняшний день это один из нескольких примеров, как теория Эйнштейна проверялась в подобных условиях[291].

Квазипериодические осцилляции наблюдаются и у активных галактик. Время изменения измеряется не секундами, а периодом от нескольких часов до нескольких месяцев[292]. Что замечательно, из этого следует, что аккреционные диски ведут

себя одинаково, несмотря на колоссальный разброс физических параметров – от черных дыр звездной массы до сверхмассивных черных дыр в далеких галактиках.

Когда черная дыра съедает звезду

Что происходит, когда черная дыра проглатывает звезду? В 1998 г. Мартин Рис предложил ответ. Он годами размышлял о возможностях обнаружения черных дыр, которые должны скрываться в центре каждой галактики. Что случится с незадачливой звездой, угодившей в область экстремальной гравитации? По мере приближения звезды к черной дыре ее сначала растягивают, а затем разрывают приливные силы. Часть ее вещества выбрасывается вовне с большой скоростью, а остальное проглатывается черной дырой, вызывая яркое свечение, которое может длиться несколько лет[293].

Такая судьба грозит только звездам, которые подбираются слишком близко к черной дыре. У каждой черной дыры есть радиус, в пределах которого приливообразующие силы разрушают небесное тело. Вне этой границы звезды сохраняют свою форму. Как только звезда входит в это пространство, начинается разрушение. Около половины массы звезды выбрасывается наружу, другая половина движется по эллиптическим орбитам, постепенно приводящим газ в аккреционный диск. Черная дыра питается этим веществом, находящимся вплотную к горизонту событий, а преобразование гравитационной энергии в излучение вызывает яркое свечение[294]. Иногда событие порождает релятивистские джеты (илл. 49). Представим, что Солнце приближается к черной дыре, которая находится в центре нашей Галактики. Ничего не случится до тех пор, пока Солнце не окажется в пределах 160 млн км от горизонта событий; затем Солнце разорвет на части, а все планеты, включая Землю, разметает, как кегли, и вероятность быть отброшенными на безопасное расстояние или проглоченными черной дырой будет равной. Приближение на такую близкую дистанцию маловероятно, поэтому разрыв приливными силами – редкое событие, случающееся в любой галактике примерно раз в 100 000 лет.

Swift J1644+57: возникновение релятивистского джета

При приближении солнцеподобной звезды к черной дыре в несколько миллионов солнечных масс радиус уничтожения

приливными силами существенно превысит радиус Шварцшильда. Однако, поскольку радиус Шварцшильда увеличивается линейно с ростом массы, а радиус уничтожения приливными силами растет медленнее, черные дыры больше 100 млн солнечных масс пожирают звезды до того, как они будут разорваны. Можно сказать, что большая черная дыра заглатывает добычу целиком, а маленькая – рвет на части, прежде чем съесть. Судьба звезды также зависит от ее размера и стадии эволюции. Большие звезды испытывают более мощные приливные силы, поэтому красный гигант, направляющийся в центр галактики, будет разорван на гораздо большем расстоянии от черной дыры, чем Солнце, а белый карлик исчезнет внутри горизонта событий целиком. Судя по численному моделированию, интенсивность аккреции после уничтожения звезды зависит от массы черной дыры. Если доверять результатам моделирования, время между разрыванием звезды и максимальной яркостью свечения можно использовать для «взвешивания» черной дыры. Для такой звезды, как Солнце, временная задержка составляет месяц в случае с черной дырой в 10^6 солнечных масс и увеличивается до трех лет, если черная дыра имеет массу в 10^9 солнечных.

Swift J1644+57: возникновение релятивистского джета
Звезда
Черная дыра
Звезда, деформированная приливными силами
Аккреционный диск
Разорванная звезда
Джет из частиц
1. Солнцеподобная звезда на сильно вытянутой орбите сближается со сверхмассивной черной дырой в сердце далекой галактики
2. Мощные приливные силы возле черной дыры все больше деформируют звезду
3. Часть звезды, обращенная к черной дыре, стекает к ней и формирует аккреционный диск. Остатки звезды
4. Возле черной дыры магнитные поля питают узкий джет из частиц с субсветовыми скоростями. С фронтальной стороны джет представляет собой ослепительно яркий источник рентгеновского и радиоизлучения

Илл. 49. Уничтожение одиночной звезды приливными силами массивной черной дыры в далекой галактике вызывает свечение, наблюдаемое спутником NASA. Звезда находится на сильно вытянутой орбите, поэтому проходит вблизи черной дыры, и сильные приливные силы разрывают ее на части. Часть газа питает аккреционный диск, а часть выпадает из гравитационного влияния черной дыры. Аккреционный диск формирует джеты, ускоряющие высокоэнергетические частицы, которые затем уносят колоссальное излучение в сторону Земли. *NASA / Центр космических полетов им. Годдарда / Swift*

Что говорят наблюдения? Рентгеновские телескопы позволили увидеть около 20 случаев разрыва небесного тела приливными силами, включая пару событий, когда аккреция была так эффективна, что яркость намного превосходила пределы, установленные Эддингтоном 100 лет назад[295]. Маленькая выборка событий показала, что резкий всплеск аккреции может питать релятивистские джеты, замеченные у радиоквазаров[296]. Все это – примеры из далеких галактик, поэтому, поняв, что газовое облако G2 направляется к черной дыре в центре нашей Галактики, астрономы пришли в восторг. В конце 2013 г. газовое облако прошло очень близко от массивной черной дыры и… ничего. Однако примерно через год после этого частота рентгеновских вспышек увеличилась в десять раз, до одной за день. Это навело на мысль о том, что объект G2 был не облаком, а звездой с большой оболочкой, и нужно больше времени, чтобы черная дыра схватила и поглотила вещество[297]. Шоу продолжается. После 15 лет сбора данных рентгеновские астрономы ждут второго прохождения G2 мимо черной дыры.

Надежды слегка омрачаются тем, что все события, наблюдаемые нами в центре Галактики, произошли 27 000 лет назад.

Тем временем оптическая астрономия внимательно следит за S2 – звездой, которая делает оборот вокруг черной дыры в центре Галактики за 16 лет. У ученых есть новый инструмент GRAVITY, объединяющий свет четырех 8,2-метровых телескопов VLT Европейской южной обсерватории и обеспечивающий точность угловых измерений, сопоставимую с точностью одиночного 130-метрового телескопа. В 2018 г. S2 пройдет очень близко от черной дыры, и у нас будет беспрецедентная возможность проверить общую теорию относительности. Предполагается, что она пройдет всего в 17 световых часах от горизонта событий со скоростью в 3 % скорости света. Она может быть разорвана на части или проглочена целиком[298].

Уничтожение звезды черной дырой, безусловно, пробуждает воображение. В 2015 г. это подсказало авторам одного репортажа аналогию с кулинарией: «Черные дыры заглатывают звезды целиком и кусками»[299], а английскую газету *Daily Mail* – на пафосный заголовок «Отзвуки космической бойни: зарегистрированы предсмертные вопли умирающих звезд, разрываемых на части сверхмассивными черными дырами»[300]. Звезды ничего не чувствуют и не издают звуков, а звук не может распространяться в вакууме, но остальное верно.

Вращение черной дыры

Черные дыры поразительно просты, теорема «об отсутствии волос» гласит, что они описываются всего двумя показателями: массой и осевым вращением. В первой части книги мы обсудили способы измерения массы черной дыры. Обычно нужен или видимый орбитальный компаньон, если черная дыра является коллапсировавшей звездой, или влияние на движение ближних звезд, если дыра массивна и находится в центре Галактики. Что можно сказать о вращении?

В теории Ньютона гравитация не зависит от вращения, но в теории Эйнштейна масса участвует в геометрии пространственно-временного континуума. В 1918 г. было предсказано, что вращение массивного объекта должно искривлять пространство-время, вызывая прецессию орбиты находящегося рядом меньшего объекта, что напоминает покачивание верхушки волчка. Такое закручивание координатной сетки называется увлечением инерциальной системы отсчета. Вспомните живое описание водоворота в рассказе По. Как и другие слабые эффекты общей теории относительности, этот первым делом надо искать

поблизости.

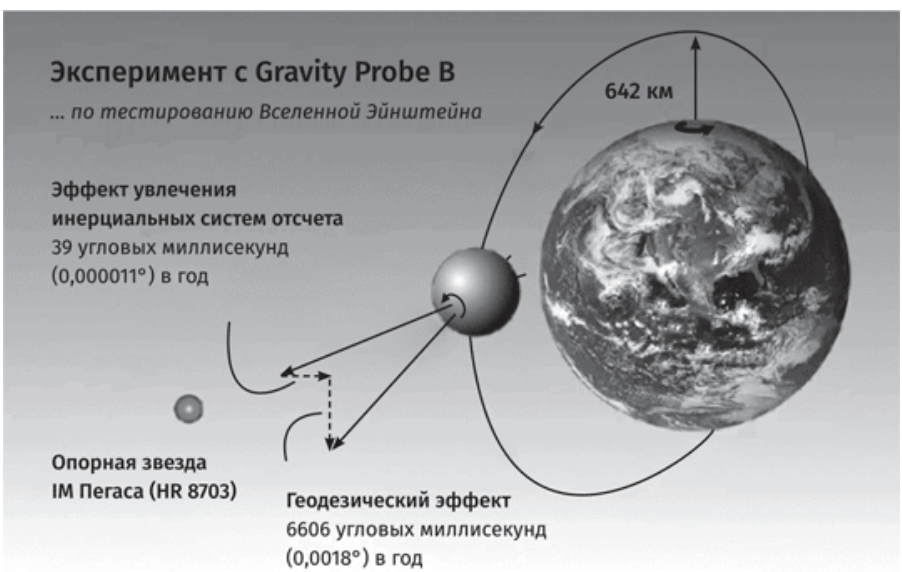
Земля закручивает пространство-время, вращаясь вокруг своей оси, но эффект настолько ничтожен, что десятилетиями ученые полагали, что обнаружить его невозможно. В 2004 г. NASA запускает спутник *Gravity Probe B* для измерения искривления пространственно-временного континуума, созданного Землей, и еще более слабого движения инерциальной системы отсчета, вызываемого ее вращением. Инструментами выступали четыре гироскопа размером с шарик для настольного тенниса. Гироскопы часто используются для управления космическим кораблем: их оси вращения сохраняют постоянное направление. Внутри гироскопов *Gravity Probe B* находились кварцевые сферы, покрытые ниобием. Это одни из наиболее точно выточенных устройств – отклонение от идеальной сферы не более чем на 40 атомов. Если увеличить их до размеров Земли, то высочайшие пики и глубочайшие впадины были бы не больше роста среднего человека. От стенок контейнеров их отделял тонкий слой жидкого гелия. При такой температуре сферы стали сверхпроводниками, и создаваемые ими электрические и магнитные поля использовались для поддержания их направленности[301].

Gravity Probe B начал 16-месячную миссию через 50 лет после получения первого финансирования[302]. Гироскопы были зафиксированы в направлении яркой звезды в созвездии Пегаса. Спутник измерял искривление пространственно-временного континуума по крохотному углу, на который гироскопы смещала земная гравитация, а увлечение инерциальной системы отсчета – по еще меньшему углу, на который «оттягивала» гироскопы Земля, вращающаяся вокруг своей оси. Неожиданный шум снизил точность эксперимента и замедлил анализ данных. Из-за этих проблем окончательные результаты были опубликованы только в 2011 г.[303] Предсказание Эйнштейна об искривлении пространственно-временного континуума подтвердилось с точностью до 0,5 %, его же прогноз увлечения инерциальных систем отсчета – до 15 % (илл. 50). Когда страсти улеглись, оказалось, что *Gravity Probe B* стал успешным (хотя и трудоемким) проектом – шедевром технического мастерства.

Осевое вращение имеет разные последствия для черных дыр малой и большой массы. Черные дыры в двойных системах массивнее своих компаньонов, и из-за такого взаимодействия их вращение почти не меняется. Скорость вращения – прямое следствие их формирования во взрыве сверхновой. Напротив, массивные черные дыры растут с течением космического времени, поглощая газ и звезды внутренних областей своих

галактик, а также сливаясь с черными дырами других галактик. Поэтому вращение массивной черной дыры хранит историю ее роста посредством аккреции и слияний. Это объясняет стремление ученых заниматься столь сложными измерениями.

Было измерено осевое вращение нескольких десятков сверхмассивных черных дыр. Чаще всего при измерениях используется спектральная линия железа, отраженная от внутренней кромки аккреционного диска. Большинство черных дыр массой от миллиона до миллиарда солнечных вращается со скоростью от 50 до 95 % скорости света[304]. Такая высокая скорость предполагает, что черные дыры выросли после одного масштабного слияния с другой галактикой, когда большая часть вещества поступила с одной стороны. От этого отличается ситуация с несколькими слияниями и относительно небольшим количеством вещества, поступающего с разных сторон, что приводило бы в среднем к медленному вращению.



Илл. 50. *Gravity Probe B* проверил два отдельных предсказания общей теории относительности в ситуации слабого поля на орбите Земли. Гироскопы использовались для очень точной фиксации спутника в небесной системе координат. Спутник измерил геодезическую прецессию — уровень «наклона» гироскопов, вызванный гравитацией Земли, и эффект увлечения системы отсчета — «замедление» гироскопов вращением Земли. Оба измерения совпали с предсказаниями теории. *К. У.Ф. Эверитт / Phys. Rev. Lett. / Американское физическое общество*

Лучший способ измерить вращение – воспользоваться

данными о внутренней зоне аккреции: спектроскопией линии железа, квазипериодическими осцилляциями и редкими событиями разрыва небесного тела приливными силами[305]. Каковы пределы скорости вращения компактных звезд? Если речь идет о нейтронных звездах, ее можно измерить только у тех, чья горячая точка излучает радиоволны, пересекающие небо, как луч прожектора. Самый быстрый пульсар совершает 716 оборотов в секунду[306]. Теория предполагает, что предел равен 1500 оборотов в секунду и что при большей скорости нейтронная звезда развалится. Максимальная скорость вращения черной дыры не зависит от структуры материи, поскольку всю информацию скрывает горизонт событий. Она определяется скоростью вращения, при которой точка на окружности горизонта событий имеет скорость света. GRS1915 + 105 в 35 000 световых лет отсюда совершает головокружительные 1000 оборотов в секунду. Это больше 85 % максимальной скорости. Эталонная черная дыра Лебедь X-1 вращается не так быстро, но и ее 790 оборотов в секунду – это 95 % теоретического предела[307].

Попробуем вообразить подобных кружащихся дервишей. GRS1915 + 105 имеет массу в 14 солнечных, поэтому ее радиус Шварцшильда – 42 км. Представим, что такая черная дыра зависла в стратосфере над Лондоном. Это было бы темное пятно, закрывающее десятую часть неба и отбрасывающее тень не только на Лондон, но и на бо?льшую часть южной Англии. GRS1915 + 105 в 300 раз меньше Земли, но намного массивнее Солнца. Турбина боевого реактивного самолета вращается так быстро, что издает звук двумя октавами выше среднего «до» из диапазона сопрано. Если бы черная дыра могла издавать звук, он был бы такой же высоты, хотя черная дыра – размером с мегаполис!

Рассмотрим противоположную крайность – большого компаньона в двойной системе черных дыр из активной галактики OJ 287 в 3,5 млрд световых лет от нас. Масса этой черной дыры составляет 18 млрд масс Солнца, радиус Шварцшильда – 50 млрд км, а точка на ее экваторе движется со скоростью 100 000 км/с – это треть скорости света[308]. Такая картина труднее поддается визуализации, но давайте попробуем сопоставить подобную сверхмассивную черную дыру с Солнечной системой. Она в десять раз больше Солнечной системы, но имеет массу маленькой галактики. Черная дыра такого размера лениво вращается вокруг своей оси, но все-таки успевает совершить оборот за пять недель. Для сравнения приведем следующий пример – чтобы показать, насколько это необычно: небесное тело в Солнечной системе, подчиняющееся законам Ньютона и расположенное на таком же расстоянии от Солнца, что и горизонт

событий этой черной дыры, совершало бы полный оборот за 5000 лет. Ничто в ближней Вселенной не предупреждало нас о столь быстром движении.

Телескоп горизонта событий

«Мы сделали невозможное». Шеп Долеман потягивал чай из листьев коки, чтобы справиться с последствиями пребывания на высоте 5000 м, на вершине вулкана в южной Мексике. Несмотря на оптимистичное заявление, ночью не все идет гладко: возникают проблемы с инструментом, а в радиотелескоп неуклонно забивается свежий снег. «Если что-то пляшет на краю черной дыры, более фундаментальных наблюдений быть не может. Будем надеяться, что найдем что-то удивительное»[309].

Долеман изучал физику в Рид-колледже в Портленде, штат Орегон – там естественники ставили эксперименты на собственном ядерном реакторе, а в студенческом клубе было не продохнуть от марихуаны. Одолеваемый тягой к путешествиям, он взял двухлетний тайм-аут перед магистратурой и бо?льшую часть этого времени посвятил научным экспериментам в Антарктике. В магистратуре Массачусетского технологического института он попробовал себя в физике плазмы и геологии и остановился на радиоастрономии, увидев красивые изображения джетов квазаров, полученные методом интерферометрии с очень длинной базой. Долеман понял, что этот метод идеально подходит для получения изображений черной дыры, и он точно знал, где ее искать – в сверхкомпактном радиоисточнике в направлении Стрельца, который называется Стрелец A*.

Центр нашей Галактики – отличное поле для подобного исследования. Именно в нем находится самое убедительное свидетельство существования объекта-кандидата на звание черной дыры, к тому же очень простого в изучении. Горизонт событий черной дыры в центре Галактики виден под углом в 50 угловых микросекунд. Это крохотный угол, но его в десять раз проще рассмотреть, чем горизонт событий сверхмассивных черных дыр во внешних галактиках, и в несколько тысяч раз проще, чем горизонт событий ближайших черных дыр звездной массы. Поэтому вокруг объекта собрались астрономы, мечтающие «прозондировать» черную дыру и проверить общую теорию относительности новыми способами.

Долеман – молодой руководитель проекта под названием «Телескоп горизонта событий»[310]. Телескоп горизонта событий – не отдельная конструкция, а система из 11 радиотелескопов, рассредоточенных по всему миру. Все эти тарелки, от Чили до

Антарктики и от Гавайев до Аризоны и Испании, работают согласованно, воспроизводя предполагаемую разрешающую способность одного телескопа – размером с Землю. Для работы с телескопом размером с весь мир нужны атомные часы, отклоняющиеся лишь на секунду за столетие. В проекте участвуют астрономы из 20 научных организаций. Данные собираются на коротких радиоволнах миллиметровой длины или меньше. На миллиметровые радиоволны влияет водяной пар в атмосфере, поэтому большинство телескопов находится в холодных и сухих местах. В результате Долеман вынужден не только работать с телескопами, которые забиты снегом, но и носить кислородную маску, тестируя оборудование на высоте более 5,3 км в Андах, и рисковать получить обморожение при работе с телескопом на Южном полюсе.

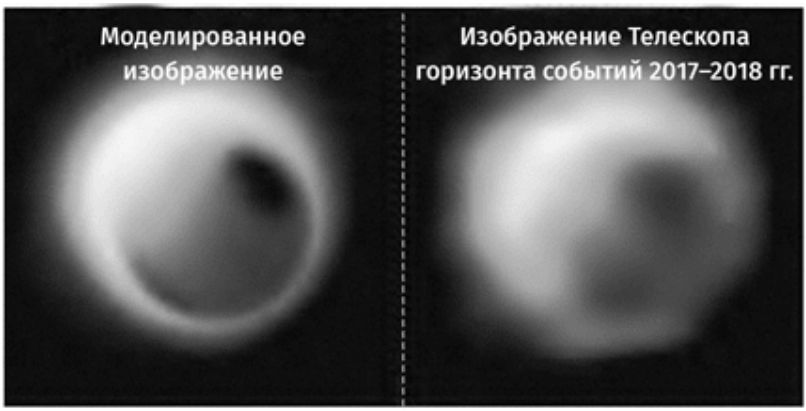
Группа из 30 ученых и инженеров работает с тарелкой радиотелескопа на горе Китт-Пик в южной Аризоне – это критически значимая часть системы. Мои коллеги из Аризонского университета Ферьял Озел и Димитриос Псалтис с помощью численных релятивистских расчетов и трассировки лучей на мощном суперкомпьютере могут вывести внешние признаки черной дыры. Другой коллега, Дэн Мэррон, каждую зиму проводит в Антарктиде, обслуживая одну из антенн системы – телескоп Южного полюса. Всем этим ученым – за сорок, они принадлежат к поколению, твердо решившему добраться до дна черных дыр – по крайней мере в переносном смысле.

В борьбе за звание самого высокого и сухого места в мире Южный полюс не имеет конкурентов. Ледовый купол поднимается над уровнем моря на 2,8 км, а влажность здесь меньше 10 %. Вся вода вморожена в лед, твердый, как гранитное материковое основание. Я надеюсь когда-нибудь попасть туда, но, пожалуй, не бесконечной зимней ночью, когда воет штормовой ветер и температура колеблется около –60 °C. Если вы зимуете на Южном полюсе, то должны быть совершенно уверены в крепости психики – собственной и коллег. Поскольку Дэн Мэррон – радиоастроном, для регистрации миллиметровых волн ему не нужно темное небо, поэтому он приезжает сюда во время антарктического лета, меняя теплую зиму Таксона на температуру чуть ниже нуля, – здесь, у подножия мира, теплее не бывает. Есть что-то поэтическое в том, чтобы отправиться в край бесконечного света, чтобы сделать снимок бесконечной тьмы.

Проект уже принес ряд впечатляющих результатов, хотя система еще даже не вышла на полную мощность. В центр Галактики падает вещество, и эта область должна быть очень яркой – с учетом размера, измеряемого телескопом горизонта

событий. Однако она является тусклой – энергия, очевидно, исчезает на горизонте событий, что является сильным аргументом в пользу черной дыры[311]. Первичные данные говорят о том, что аккреционный диск повернут к нам практически ребром, и это позволяет измерить скорость вращения диска, таким образом определив границы параметров вращения черной дыры. Переменная яркость компактного радиоисточника связана с изменениями потока аккреции – очень близко от черной дыры. Результаты моделирования говорят о том, что система скоро станет весьма чувствительной и поставленные цели будут достигнуты – будет получено первое в истории изображение черной дыры (илл. 51)[312].

Изображение – если его удастся получить – будет выглядеть как маленький темный кружок, состоящий из ничего. Общая теория относительности утверждает, что тьма должна иметь 80 млн км в поперечнике, что при наблюдении с Земли аналогично размеру макового семечка, находящегося в Нью-Йорке, если смотреть на него из Лос-Анджелеса. Силуэт будет удвоен в размерах в силу гравитационного отклонения света и обрамлен светом окружающих звезд. Если его форма не будет правильным кругом, у нас появится повод усомниться в верности теоремы «об отсутствии волос» у черных дыр[313]. Если же форма и размер изображения точно совпадут с предсказаниями общей теории относительности, оно на данный момент станет лучшим визуальным подтверждением того, что пространство и время действительно могут сворачиваться в мячик и что четыре миллиона солнц могут исчезнуть почти бесследно.



Илл. 51. Слева представлен результат моделирования черной дыры в центре нашей Галактики. Моделирование использует метод измерения потока аккреции и показывает линзирование света вокруг черной дыры с образованием четко различимого кольца вокруг затемненной области черной дыры. Диаметр кольца в пять раз больше радиуса Шварцшильда. Изображение будет ярким на стороне аккреционного диска, двигающейся на нас, и тусклым на стороне, двигающейся от нас. Справа — изображение ожидаемой производительности Телескопа горизонта событий в 2018 г. *А Бродерик, В. Фиш / Институт «Периметр» и Университет Ватерлоо / ApJ, vol. 795, публикуется с разрешения / копирайт Американского астрономического общества*

7. Учимся смотреть глазами гравитации

Грядет революция. Скоро мы сможем «видеть» черные дыры в действии. Четыреста лет астрономы изучали Вселенную исключительно при помощи света и других видов электромагнитного излучения. Они оценивали свойства «материала» Вселенной по его излучению и взаимодействию с излучением. И вот в 2015 г. впервые были зарегистрированы гравитационные волны.

Гравитационные волны – колебания пространственно-временного континуума, перемещающиеся со скоростью света. Это уникальная возможность взглянуть на мощную гравитацию черных дыр, нейтронных и сверхновых звезд, что позволит астрономам проверить общую теорию относительности новым способом. Волны проходят через огромные расстояния и могут служить инструментами исследования Вселенной – какой она была сразу после Большого взрыва. Возможность смотреть глазами гравитации обещает изменить наше понимание черных дыр.

Видеть Вселенную по-новому

Наши взгляды на Вселенную радикально менялись дважды. Первая революция началась в 1610 г., когда Галилей направил новое изобретение – телескоп – в ночное небо. Его лучший телескоп имел объектив диаметром в пару сантиметров и собирал в сто раз больше света, чем глаз человека. Со времен Галилея астрономы существенно усовершенствовали простую подзорную трубу. Сто лет назад они начали использовать зеркала вместо линз для сбора света, поскольку большие линзы деформировались и не фокусировали все цвета в одной точке. Современные астрономы строят телескопы диаметром 10 м, используя одно сплошное зеркало или мозаику из небольших шестиугольных сегментов[314]. За четыре века с эпохи Галилея собирающая сила телескопов увеличилась в миллион раз.

Между тем усовершенствование способа обнаружения света обеспечило и дополнительную глубину изображения. Глаз человека как химический детектор – несовершенен. Чтобы создать иллюзию непрерывного движения, он должен передавать мозгу поступающую на сетчатку информацию десять раз в секунду. Следовательно, глаз собирает свет – или «интегрирует» – только в течение десятой доли секунды. В середине XIX в. была изобретена фотография, и вскоре астрономы стали использовать

ее для получения изображений ночного неба. Свет фиксируется химическим процессом – не более эффективным, чем в случае с человеческим глазом, но длинная выдержка значительно увеличивает глубину. Настоящий прорыв произошел в 1980-х гг., когда существенно усовершенствовали цифровое формирование изображений. Современные приборы с зарядовой связью (ПЗС) с эффективностью 80–90 % преобразуют входящие фотоны в электроны, а их – в электрический сигнал, который легко оцифровывается. ПЗС – почти совершенные детекторы, в 100 000 раз более эффективные, чем глаз человека.

Благодаря сочетанию этих факторов лучшие телескопы по глубине превосходят человеческое зрение в 100 млрд раз. Это значит, что если обитатель Северного полушария видит лишь одну внешнюю галактику – M31, то большой телескоп видит 100 млрд галактик. Следовательно, астрономы могут наблюдать не только звезды, удаленные на несколько сотен световых лет, но и свет, находившийся в пути 13 млрд лет. ПЗС настолько усовершенствовались, что за год большие телескопы регистрируют больше фотонов, чем глаза всех людей в истории человечества.

Вторая революция в видении Вселенной произошла в первой половине XX в. Со времен наших древнейших предков, глядевших в небеса над африканской саванной, астрономы пользовались узким фрагментом электромагнитного спектра. Свет от самого светлого голубого до густейшего красного различается длиной волны или частотой всего в два раза. Самые большие телескопы лишь глубже заглядывают в ту же самую узкую щель в спектре.

Развитие технологий расширило электромагнитный спектр для астрономии. Просмотр Вселенной в видимом свете столь же ограничен, что и черно-белое изображение – в сравнении с полноцветным. Пожалуй, лучшую аналогию предлагает музыка: видимый свет – это две соседние клавиши фортепиано, а электромагнитный спектр от радиоволн до гамма-лучей – вся клавиатура из 88 клавиш. Первыми невидимыми волнами в арсенале астрономии стали радиоволны. В конце XIX в. Гульельмо Маркони[315] продемонстрировал, что радиоволны можно передавать и принимать на больших расстояниях, и, как мы уже видели, через 30 лет Карл Янский с помощью простой антенны обнаружил радиоволны, идущие из центра нашей Галактики. В 1920-х гг. два астронома обсерватории Маунт-Вилсон использовали устройство, преобразующее разницу температур в электрический сигнал для регистрации инфракрасного излучения ряда ярких звезд[316], но инфракрасная астрономия стала развиваться только в 1970-х гг. – с появлением

более чувствительных детекторов. Наблюдения на невидимых коротких волнах были невозможны до тех пор, пока астрономы не нашли способ обойти излучение, поглощаемое атмосферой Земли. Рентгеновское излучение Солнца в 1949 г. впервые обнаружила геофизическая ракета, а эталонную черную дыру Лебедь X-1 открыли через 15 лет. Рентгеновская астрономия быстро развивалась в 1970-х гг., когда была запущена серия спутников. Космические гамма-лучи были предсказаны за годы до того, как их увидели спутники в 1990-х гг.[317]

Развитие технологий обеспечило астрономов инструментами для регистрации волн – как очень длинных, до 10 м, так и очень коротких, длиной в тысячную долю размера протона (частоты от 10^8 до 10^{27} Гц). Расширение доступного диапазона, ранее превосходившего возможности глаза всего в два раза, а теперь – в десять миллиардов миллиардов раз, показывает, как сильно технологии трансформировали наш взгляд на Вселенную. Не так много источников можно зарегистрировать на всех длинах волн электромагнитного спектра, и все они являются активными галактиками, питаемыми сверхмассивными черными дырами[318].

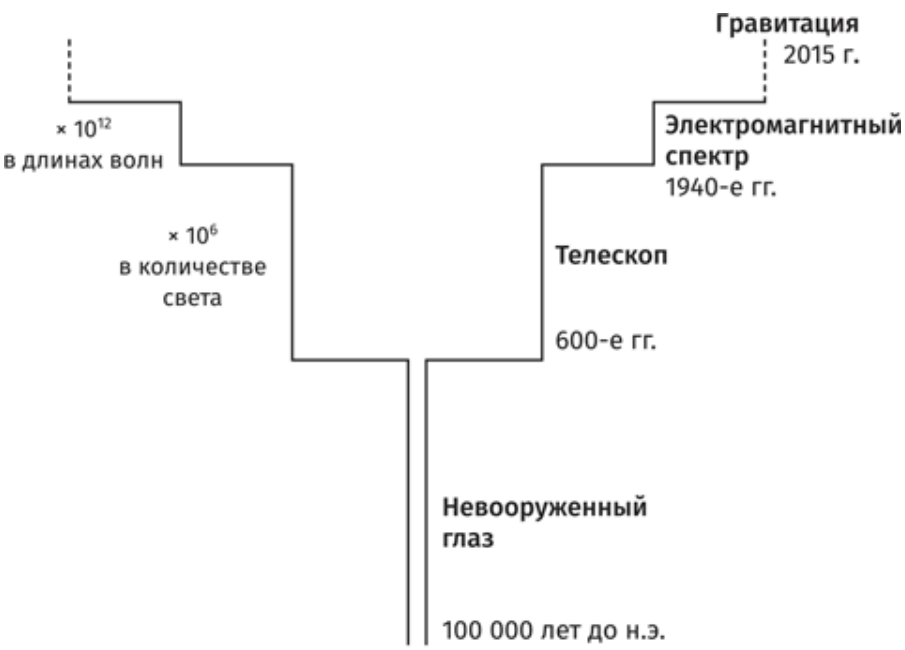
Все знания о Вселенной мы получаем с помощью телескопов, собирающих излучение. Очень легко забыть о том, что мы полагаемся на косвенную информацию. Вселенная полна материи: крупицы пыли, газовые облака, луны, планеты, звезды, галактики. Мы не видим эту материю воочию, а судим о ее свойствах по взаимодействию с электромагнитным излучением. Химические элементы определяются по характерным спектральным линиям излучения или поглощения. Крупицы пыли проявляют себя, поглощая свет и излучая инфракрасные волны. Луны и планеты видны в отраженном свете ближних звезд. Звезды видимы за счет излучения, являющегося побочным продуктом реакций ядерного синтеза. Галактики картируются при помощи доплеровского смещения спектральных линий их газа и звезд.

Все это – опосредованные наблюдения, и все они охватывают лишь 5 % Вселенной – ее нормальную материю. Темная материя и темная энергия, на долю которых приходится 95 %, до сих пор невидимы для нас, потому что не взаимодействуют с излучением. Астрономические объекты – это актеры, но «сцена» космической пьесы также не видна. Астрономы проследили расширение Вселенной, используя галактики как метки в невидимом пространственно-временном континууме.

Регистрация черных дыр также является косвенной. Самый ближний к черной дыре источник информации для нас – это высокоэнергетическое излучение окружающей ее короны,

отражающееся от внутренней части аккреционного диска; затем по рентгеновским спектральным линиям можно установить массу и вращение черной дыры.

Вот бы увидеть «материал» Вселенной без посредничества электромагнитного излучения! Напрямую воспринять прогиб пространственно-временного континуума! Для этого нужны «глаза гравитации» (илл. 52). Их проще всего представить себе на примере телепатии. Головной мозг – это сгусток живой ткани весом около 1,35 кг. При более близком рассмотрении он представляет собой электрохимическую сеть из миллиардов нейронов и триллионов связей между ними. Однако эти факты ничего не говорят о том, где мы храним воспоминания, эмоции, ситуативные мысли и чувство «я». Видеть Вселенную в разрезе гравитации так же увлекательно, как наблюдать мысли и чувства других людей в реальном времени[319].



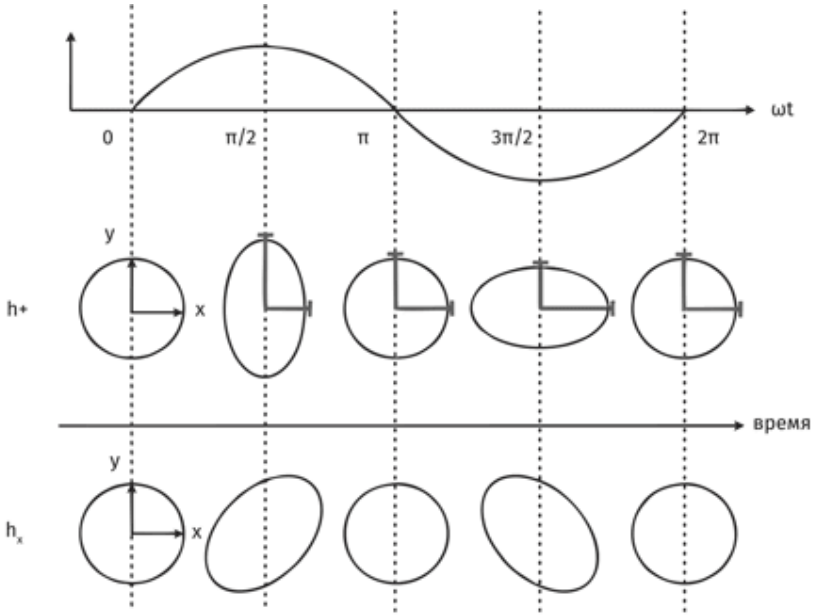
Илл. 52. Наш способ восприятия Вселенной пережил всего три революции. Бóльшую часть истории человечество ограничивалось астрономическими наблюдениями невооруженным глазом. В 1609 г. Галилей использовал телескоп для того, чтобы поймать больше света, и через четыре столетия после этого диаметр телескопов превысил 10 м. В начале XX в. цепочка технологических достижений, включая новые детекторы и космические телескопы, открыла астрономии весь электромагнитный спектр — от радиоволн до гамма-лучей. В 2015 г. регистрация гравитационных волн впервые позволила нам увидеть Вселенную «глазами гравитации». *Крис Импи*

Колебания пространственно-временного континуума

Что это за колебания? Давайте вспомним, что в общей теории относительности материя управляет кривизной пространства-времени. Гравитационные волны возникают всякий раз, когда масса меняет его движение или конфигурацию[320]. Волны деформированного пространства излучаются во все стороны от источника так же, как волны, которые расходятся кругами от камня, брошенного в пруд. В теории волны движутся со скоростью света и слабеют по мере удаления от источника. Пространственная деформация чрезвычайно слаба для большей части движущейся материи. Наиболее сильные гравитационные волны возникают вследствие самых ярких событий в космосе: орбитального движения и столкновения черных дыр,

орбитального движения и столкновения нейтронных звезд, взрывов сверхновых и бурного рождения самой Вселенной.

Представьте идеально плоское пространство-время, где на плоскости лежит круглое кольцо из частиц. Я представляю его как плоскость экрана своего компьютера. Частицы нужны только для того, чтобы сделать видимым невидимый пространственно-временной континуум. Если гравитационная волна проходит прямо в экран или из экрана, кольцо частиц, следуя искривлению пространства-времени, попеременно слегка сдвигается в вертикальном и горизонтальном направлениях, и этот сдвиг повторяется с определенным периодом (илл. 53)[321]. Гравитационные волны, как и все прочие, характеризуются амплитудой, частотой, длиной и скоростью. Амплитуда – это величина смещения кольца частиц при прохождении волны. Частота показывает, сколько раз за секунду растягивается или сжимается кольцо. Длина волны – это расстояние вдоль волны между точками максимального растяжения или сжатия. Волны движутся в космосе со скоростью света, деформируя физические тела, при этом проходя сквозь них, словно тех не существует[322].



Илл. 53. Гравитационные волны — это синусоидальные колебания пространственно-временного континуума, представленные в верхней части рисунка в виде одного полного цикла изменения амплитуды. Две независимые поляризации гравитационных волн, показанные в средней и нижней частях рисунка, смещены на 45°, а не на 90° — как электромагнитные волны. В этом примере волна движется перпендикулярно странице. В средней части изображены плечи интерферометра, свидетельствующие о способе обнаружения таких волн. На этой диаграмме искажение сильно преувеличено, в действительности отклонения от формы круга были бы неразличимыми. *С. Миршекари / Вашингтонский университет, Сент-Луис, используется с разрешения*

По аналогии мы представляем, как круг сплющивается и растягивается в эллипс, но это весьма преувеличенное реальное искажение для типичной гравитационной волны. Воображаемое кольцо из частиц отклоняется от формы круга на 10^{-21} – одна частица из тысячи миллиардов миллиардов! Казалось бы, невозможно поставить эксперимент, где регистрировалось бы такое ничтожно слабое волнение пространственно-временного континуума.

Сам автор теории, предсказавшей гравитационные волны, сначала не верил, что они реальны. Как мы узнали, Эйнштейн отрицал существование черных дыр и недооценивал гравитационное линзирование. В 1916 г. по совету своего коллеги Анри Пуанкаре он провел аналогию с электромагнетизмом. Когда

электрическая цепь движется туда-сюда, то колебательное возмущение создает электромагнитную волну – например, свет. Эйнштейн знал, что материя искривляет пространство, и представлялось логичным, что движущаяся материя вызывает в пространстве колебательное возмущение.

При разработке этой идеи Эйнштейн столкнулся с большими проблемами. Аналогия неверна, поскольку электрический заряд может быть положительным и отрицательным, а в области гравитации нет такой вещи, как отрицательная масса. Эйнштейн упорно бился над координатными системами и приближениями, чтобы выполнить необходимые расчеты. Он «спроектировал» три типа волн и потерпел полный крах, когда Артур Эддингтон доказал, что две волны являются математическими артефактами, способными перемещаться с любой скоростью. Не теряя серьезности, Эддингтон шутил, что они могут даже «распространяться со скоростью мысли»[323].

К 1936 г. Эйнштейн собрался с духом. Всякий раз, когда он пытался написать формулу плоской волны, как в нашей аналогии с экраном компьютера, он сталкивался с сингулярностью, где уравнения выходили из-под контроля, а значения становились бесконечными. Вместе с Натаном Розеном, своим студентом в Принстоне, он написал статью под названием «Существуют ли гравитационные волны?», в которой ответил на поставленный вопрос эмоциональным «Нет!». Он подал статью в престижный журнал *Physical Review* и был ошеломлен, когда анонимный рецензент отверг ее и указал на несколько ошибок. Прежде Эйнштейн никогда не сталкивался с рецензированием со стороны коллег, в Германии его статьи публиковались без вопросов. Он написал редактору гневное письмо: «Мы (мистер Розен и я) послали вам свою рукопись для публикации и не уполномочивали вас показывать ее специалистам до того, как она будет напечатана. Я не вижу причин, по которым я должен реагировать на комментарии вашего анонимного эксперта – в любом случае они ошибочны»[324].

Однако Эйнштейн заблуждался, и другой его молодой коллега указал на ошибку – по иронии судьбы, за день до выступления ученого в Принстоне с лекцией «Невозможность существования гравитационных волн». Когда Эйнштейн и Розен напечатали исправленную статью в другом журнале, физики разделились на два лагеря[325]. Многие считали гравитационные волны математическим конструктом, не имеющим отношения к физике, однако после первоначальных сомнений сам Эйнштейн уверился в том, что они реальны. Его теория была успешной, и он постепенно начал доверять собственным предсказаниям.

Эксцентричный миллионер и инженер-одиночка

Рябь пространственно-временного континуума так трудно обнаружить, что физика игнорировала ее. В течение 20 лет после публикации статьи Эйнштейна и Розена идея была задвинута в дальние ящики физической эзотерики, но потом ей заинтересовался эксцентричный американский миллионер Роджер У. Бабсон. Если вы никогда не думали, что физика может сделать вас богатым, обратите внимание на эту историю.

Интерес Бабсона к гравитации начался с семейной трагедии. Его старшая сестра утонула в младенчестве, и он впоследствии заметил, что это случилось потому, что она не смогла справиться с гравитацией. Он строил карьеру, применяя собственную версию законов Ньютона к торгам на бирже. «Все, что поднимается, обязательно упадет, – говорил он, добавляя: – А каждое действие вызывает реакцию»[326]. Он предугадал биржевой крах 1929 г. и всегда ухитрялся покупать дешевые акции в момент роста и продавать их до падения цены[327]. По словам Бабсона, своими миллионами он обязан гравитации.

В 1949 г. Бабсон основал Фонд изучения гравитации и проспонсировал популярный конкурс работ о способах противодействия или нейтрализации гравитации. Разумеется, победителями стали не самые выдающиеся научные труды. В рекламных материалах фонда победа над гравитацией рассматривалась в контексте хождения Иисуса по воде[328]. Уважаемые физики в нем не участвовали, а популяризатор науки Мартин Гарднер назвал фонд «пожалуй, самым бесполезным проектом XX в.»[329].

Пытаясь восстановить доверие физического сообщества, Бабсон создал организацию, единственной задачей которой было финансирование фундаментального исследования гравитации. Он попросил физика из Принстона Джона Уилера, автора понятия «черная дыра», убедить своего коллегу Брайса Девитта возглавить новое учреждение. В начале 1957 г. Девитт организовал в университете Северной Каролины эпохальную конференцию по вопросам гравитации и общей теории относительности.

Конференция вдохновила молодое поколение физиков-теоретиков, занимавшихся проблемами гравитации[330]. Дискуссия о гравитационных волнах сосредоточилась на вопросе о том, переносят ли они энергию. Доказательство Ричарда Фейнмана с «липкими шариками» убедило большинство присутствующих. Он предложил представить два отдельных кольца из шариков, плотно охватывающих металлический стержень. Когда через стержень проходит гравитационная волна,

она заставляет кольца немного сдвигаться назад и вперед. Трение колец о стержень вызывает его нагрев. Следовательно, энергия волны передается стержню. Среди слушателей был молодой инженер Джозеф Вебер, внимательно следивший за обсуждением.

Вебер родился в бедной семье литовских иммигрантов, его имя было англизировано для упрощения ассимиляции. Он бросил колледж, чтобы не тратить деньги родителей, и поступил в ВМФ, где дослужился до капитан-лейтенанта. Во время Второй мировой войны Вебер руководил силами радиоэлектронного противодействия ВМФ, а после войны устроился работать на инженерный факультет Мэрилендского университета. Научная жизнь Вебера представляла собой цепочку промахов мимо верной, казалось бы, цели. Георгий Гамов мог поручить ему диссертационный проект по регистрации микроволнового излучения Большого взрыва, но не поручил, и Нобелевская премия за последующее, сделанное случайно открытие досталась Арно Пензиасу и Роберту Вильсону. В 1951 г. Вебер написал первую статью с изложением идеи мазеров и лазеров, но пионером этих технологических инноваций стал прочитавший статью Чарльз Таунс. Однако самым болезненным промахом Вебера стали гравитационные волны[331].

Вдохновленный конференцией в Чапел-Хилл, Вебер задался вопросом регистрации гравитационных волн. Он предложил подвесить металлический цилиндр на проволоке в вакуумной камере, чтобы изолировать его от окружающей среды. Его цилиндр был 1,5 м длиной и две трети метра в диаметре, весил три тонны. Его окружали пьезоэлектрические датчики, преобразующие механические вибрации в электрические сигналы[332]. Вебер надеялся, что, если через цилиндр пройдет гравитационная волна, тот зазвенит, как колокольчик, по которому ударили молотком (илл. 54).

Вебер разместил одну из своих «антенн» в Мэрилендском университете, а еще одну, точно такую же, на расстоянии 960 км от первой, в Аргоннской национальной лаборатории недалеко от Чикаго. Для обмена данными использовалась быстродействующая телефонная линия. Два одинаковых детектора должны были исключить местный шум, возникающий вследствие гроз, слабых землетрясений, ливней космических частиц, выбросов электропитания и любых других факторов, которые могли бы потревожить цилиндр. Сигнал, не записанный одновременно в двух местах, считался бы ложным. Помимо событий местного значения, постоянным источником шума в эксперименте Вебера было тепловое движение атомов алюминиевого цилиндра. Из-за этой неустранимой активности длина цилиндра случайным

образом менялась примерно на 10^{-16} м – менее чем на размер протона.

Вебер решил, что попал в яблочко, когда увидел сигналы, намного превосходящие уровень тепловых помех. В 1969 г. он опубликовал сообщение о регистрации гравитационных волн и объявил об этом на одном из крупнейших симпозиумов по вопросам гравитации и теории относительности. Год спустя Вебер заявил, что многие гравитационные волны исходят из центра галактики Млечный Путь[333]. Физики были очень удивлены, многие озадачены, но то, что главное предсказание общей теории относительности подтвердилось, привело ученых в восторг. Вебера стали восхвалять, его фото украшало обложки журналов. Он прославился.

Илл. 54. Джозеф Вебер и его первый в истории детектор гравитационных волн, установленный в физической лаборатории Мэрилендского университета. Такой же детектор был помещен на расстоянии 960 км; истинный сигнал должен быть зарегистрирован обоими детекторами. Как ранее Гроут Ребер, так и Вебер некоторое время был единственным экспериментатором в этой новой области астрофизики. Он объявил о регистрации гравитационных волн в 1969 г., но никто не смог повторить его результаты, и его репутация пострадала. *В. Тримбл, используется с разрешения*

Затем все стало рушиться. Веберовские сигналы из центра Млечного Пути заставляли предположить, что в год 1000 солнечных масс преобразуется в энергию гравитационных волн. Молодой физик-теоретик Мартин Рис вычислил, что из-за такой потери массы Галактика утратила бы «связность» и разлетелась. Другие экспериментаторы пытались повторить результаты

Вебера. Антенны Вебера установили в Соединенных Штатах, Германии, Италии, России и Японии. Рон Древер, с которым мы еще познакомимся, поставил несколько детекторов в Глазго. Антенна Вебера появилась даже на Луне, где ее установили в 1972 г. астронавты миссии «Аполлон». К середине 1970-х гг. несколько групп ученых усовершенствовали конструкцию Вебера и повысили чувствительность прибора; многие охлаждали антенны, чтобы устранить тепловой шум.

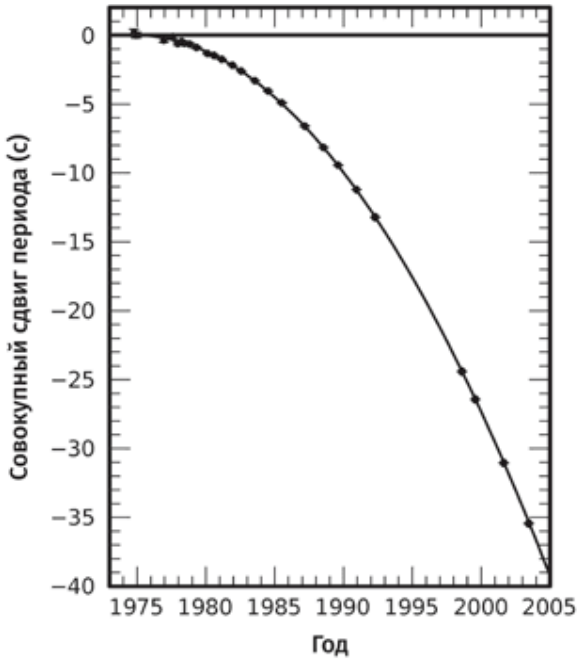
Никто ничего не зарегистрировал. Физики начали сомневаться в методе эксперимента Вебера. Судя по всему, он неверно рассчитал статистические параметры совпадающих событий для детекторов, разнесенных далеко друг от друга. Проклятием для Вебера стало его утверждение, что пик регистраций наблюдается каждые 24 часа, когда над головой проходит центр нашей Галактики. Ему скоро указали, что гравитационные волны проходят сквозь Землю, как нож сквозь масло, и пик должен происходить каждые 12 часов. В 1974 г. на седьмой главной конференции по гравитации и относительности ведущий физик IBM Ричард Гарвин оспорил открытие Вебера и его данные.

Вскоре с ним согласилось все сообщество физиков. Вебера обвинили в несовершенстве метода эксперимента, более того, в предвзятости при подаче данных. И все же он продолжал верить, что наблюдал колебания пространственно-временного континуума, и к концу карьеры превратился в озлобленного одиночку[334].

Тем не менее работа Вебера способствовала инновации, стимулируя попытки других физиков найти доказательства ключевого предсказания общей теории относительности. Джон Уилер писал:

> После нашей совместной работы в Лейдене он с религиозным пылом взялся за идею гравитационных волн и гонялся за ними до конца своей профессиональной карьеры. Я иногда задаюсь вопросом, не пробудил ли я в Вебере чрезмерный энтузиазм по поводу столь неподъемно сложной задачи. Не столь важно, является ли в конце концов первооткрывателем гравитационных волн он, другой человек или группа людей. В действительности он всегда будет заслуживать уважения – ведь он возглавил движение по этому пути. Больше ни у кого не хватило смелости искать гравитационные волны – до тех пор, пока Вебер не показал, что это в пределах возможного[335].

Несмотря на разочаровывающие результаты экспериментов Вебера, оставалась слабая надежда. В 1974 г. Джо Тейлор и Рассел Халс наблюдали за пульсарами с помощью 305-метрового радиотелескопа в Аресибо. Они нашли пульсар, совершающий 17 оборотов в секунду, но заметили систематическое изменение времени прихода импульсов. Период изменений составлял восемь часов, что заставляло предположить наличие двойной системы. Дополнительные наблюдения показали, что PSR1913 + 16 – это пара нейтронных звезд на тесной орбите немногим больше размера Солнца. Тейлор и Халс сообразили, что общая теория относительности предсказывает постепенное сближение компонентов двойной системы: орбитальный период должен сокращаться на 77 микросекунд в год, поскольку гравитационные волны уносят энергию системы. Пульсары – идеальные часы, и крохотное изменение периода было наблюдаемым (илл. 55). Обнаруженное уменьшение орбиты точно совпадало с предсказанием общей теории относительности[336]. Это было убедительное, хотя и косвенное свидетельство в пользу гравитационных волн[337]. За эти точнейшие наблюдения Тейлор и Халс удостоились Нобелевской премии по физике в 1993 г.



Илл. 55. Уменьшение периода двойной системы пульсаров PSR1913+16, наблюдаемое Расселом Халсом и Джо Тейлором с помощью 305-метрового радиотелескопа обсерватории Аресибо. Система теряет энергию, излучая гравитационные волны, и данные наблюдений в точности совпадают с предсказанием общей теории относительности. Данные стали убедительным подтверждением правильности этой теории и косвенным свидетельством существования гравитационных волн. *Inductiveload*

Двойной пульсар указал дальнейший путь. Открыли еще десяток систем. Астрономы поняли, что должны существовать и двойные черные дыры с более сильной гравитацией и, соответственно, более мощными гравитационными волнами. Возможно, достаточно чувствительный детектор позволил бы обнаружить их напрямую.

Когда сталкиваются черные дыры

Это история двух сформированных черных дыр, чье столкновение моментально высвободило огромное количество гравитационных волн, несущих в десять раз больше энергии, чем свет всех звезд во Вселенной. Это также история появления новой области астрономии.

Перенесемся на 11 млрд лет назад. Вселенная – милое местечко, она в три раза меньше и в три раза плотнее, чем сейчас.

Она переживает «этап строительства»: небольшие плотные галактики сливаются друг с другом и в них активно образуются звезды. В одной маленькой и ничем не примечательной галактике, в области, где хаотически перемещаются газ и пыль, образуется две огромные звезды – в непосредственной близости друг от друга. Они в 60 и в 100 раз массивнее Солнца – предельной для звезд массы. Всего за несколько миллионов лет – по космическим меркам это мгновение – обе звезды расходуют ядерное топливо. Более массивная из них живет быстрее и раньше умирает, но, пока она стареет и раздувается, меньшая компаньонка крадет ее газ, превосходит ее массой и становится черной дырой. Черная дыра высасывает газ звезды-компаньона, и пара скрывается под газовым саваном, перекрученным от орбитального движения. Газ поглощает энергию орбитального движения, сближая звезды на такое же расстояние, как между Меркурием и Солнцем. Вторая звезда умирает и тоже становится черной дырой.

По окончании этапа вампиризма остаются две черные дыры. Каждая скрывает 30 солнечных масс под непроницаемой завесой горизонта событий диаметром 240 км. Они неторопливо обращаются относительно друг друга, скованные объятиями гравитации[338].

Десять миллиардов лет ничего не меняется. Пара вращается в тишине и мраке, скупо испуская слабые гравитационные волны, и это понемногу приближает партнеров друг к другу. Между тем Вселенная становится больше, старше и холоднее. Скорость расширения пространства, прежде замедлявшаяся, начинает ускоряться, когда темная материя уступает пальму первенства темной энергии. Процесс формирования звезд достигает пика и идет на спад, и, разумеется, на поверхности множества землеподобных планет расцветают и рушатся инопланетные цивилизации. На планете же, которую мы зовем своим домом, через 3 млрд лет после возникновения жизнь все еще остается исключительно микробиологической.

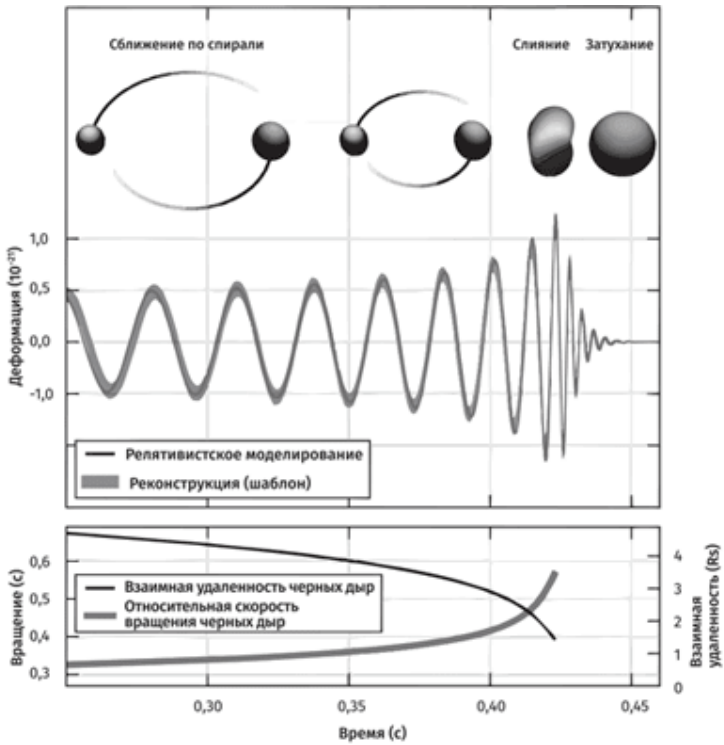
Затем активность приближается к крещендо. По мере сближения черных дыр гравитация усиливается, излучается больше гравитационных волн, размер орбиты уменьшается, и процесс ускоряется еще сильнее. Последние фазы длятся лишь две десятых секунды. Орбитальная скорость черных дыр увеличивается, и они влетают в смертельную спираль. Пространство-время бурлит, как кипящая вода в кастрюле. Частота генерируемых гравитационных волн определяется орбитальным периодом. Она подскакивает с 35 Гц до 350 Гц. Чтобы изобразить это в звуке, за долю секунды проведите рукой

по клавишам фортепиано от самого низкого ля до до средней октавы. Представьте орбиту хорошо знакомого небесного тела – например, Луны. Луна удалена от Земли на 400 000 км и за месяц совершает полный оборот вокруг нее. В конце смертельной спирали черные дыры, каждая в 10 млн раз массивнее Земли, находятся примерно в 160 км друг от друга и мчатся, совершая 300 оборотов в секунду, то есть двигаются друг относительно друга со скоростью в половину световой. Это уже не орбитальное движение, а безумие.

Затем горизонты событий соприкасаются, и черные дыры сливаются. Уравнения для этого процесса не имеют решений; даже суперкомпьютеры не могут рассчитать происходящее. Последняя фаза называется затуханием, когда возникший в результате слияния объект колеблется, как гигантский ком темного желе, а затем успокаивается, приняв форму одной черной дыры, в два раза превосходящей каждую из участниц слияния массой и размером (илл. 56). В количественных характеристиках 5 % массы преобразуется в гравитационные волны. Миллион земных масс превращается в энергию колебаний пространственно-временного континуума и избегает «погребения» в черной дыре. (Для сравнения: Солнце за одну секунду преобразует в лучистую энергию одну тысячу триллионных долей массы Земли.) Пульсация гравитационных волн уносится с места действия со скоростью света, распространяясь во все стороны, как волны в трехмерном пруду. Самый мощный взрыв в истории наблюдений за Вселенной происходит в тишине и полнейшей тьме.

Колебания пронизывают бездны межгалактического пространства, ослабевая по мере удаления от источника. Они проходят сквозь миллионы галактик, возможно, оставаясь незамеченными. Тем временем на Земле жизнь выходит из океанов на сушу, в результате планетарного катаклизма появляются и вымирают динозавры, у одной из ветвей эволюционной линии приматов развивается большой головной мозг. Когда гравитационные волны проходят через соседние галактики, Магеллановы Облака, наши предки осваивают огонь. Когда волны проникают в Млечный Путь, люди впервые покидают Африку. Волны минуют яркую звезду Бета Летучей Рыбы, а Альберт Эйнштейн публикует статью о своей новой теории гравитации. Волны проходят рядом с ближней к нам карликовой звездой 82 Эридана, а в отдаленных друг от друга местах на территории США начинается строительство огромного научного инструмента. Пять лет инструмент совершенствуется и не используется для наблюдений; он готов получить первые научные

данные в тот момент, когда волны прокатываются по Солнечной системе и устремляются к Земле.



Илл. 56. Финальные стадии слияния двух черных дыр, возникших после того, как массивные звезды завершили эволюцию и погибли как сверхновые. После медленного сближения продолжительностью в миллионы лет черные дыры по спирали устремляются друг к другу, сливаются и вибрируют, а затем успокаиваются. Вся последовательность событий занимает меньше 0,2 секунды. В средней части представлен сигнал гравитационной волны, предсказанный численными релятивистскими расчетами, внизу показано, что две черные дыры сливаются со скоростью, превышающей половину скорости света. *Научная коллаборация LIGO / Физический институт*

Марко Драго застыл в напряжении. Тридцатидвухлетний постдок из Италии держит чашку с капучино, сидя перед экраном своего компьютера в Институте Альберта Эйнштейна в Германии – и вдруг видит на экране маленькую загогулину. Сначала программное обеспечение отмечает событие как ложный сигнал, но после автоматической перекрестной проверки метка снимается. Марко понимает, что прозвучал голос Вселенной, и составляет электронное письмо с темой «Очень интересное

событие». Он находится «у руля» самого точного прибора в истории.

Самый точный прибор в истории

Сколько физиков нужно, чтобы измерить сдвиг в одну десятую размера протона? Ответ: больше тысячи. Марко Драго – один из целой армии ученых, работающих в десятках университетов и исследовательских институтов по всему миру над самым чувствительным научным инструментом за все время их изобретения. История о том, как удалось построить лазерно-интерферометрическую гравитационно-волновую обсерваторию, LIGO, почти столь же невероятна, как и регистрация колебаний пространственно-временного континуума.

Мы прервали рассказ о попытках зарегистрировать гравитационные волны в момент, когда в этой сфере царил хаос. Никто не смог повторить результаты Вебера, его научная репутация была погублена. Позорное пятно казалось несмываемым, и это несправедливо. Охотники за гравитационными волнами считались шарлатанами или глупцами – а может, теми и другими.

Однако нашлась группа исследователей, чей азарт лишь подхлестнула неспособность воспроизвести результаты Вебера. Как экспериментаторы они были намерены найти лучшие способы. Оптимизм вселяло обнаруженное Тейлором и Халсом замедление вращения пульсаров, что доказывало существование гравитационных волн. В эту мужскую компанию (поскольку это была и есть сфера мужского доминирования) входил физик Массачусетского технологического института Райнер Вайсс. Когда он был ребенком, его семья бежала из нацистской Германии. Он рос в Нью-Йорке, предоставленный сам себе, с головой уйдя в увлечения: классическую музыку и электронику. Он бросил учебу в МТИ, прошел весь путь с самой нижней ступени – с техника в физической лаборатории – и вернулся в МТИ, но нелегко было добиться штатной должности. Разочарованием обернулись и попытки объяснить студентам результаты Вебера. «Я, хоть убей, не мог понять затею Вебера, – сказал он. – Я не считал, что он прав, и решил пойти своим путем»[339].

Все лето Вайсс в подвале один работал над идеей, возникшей из обсуждений со студентами МТИ[340], и создал детектор, являвшийся не отдельным стержнем-антенной, а интерферометром. Представьте два металлических стержня, соединенных под прямым углом в форме буквы L. Если

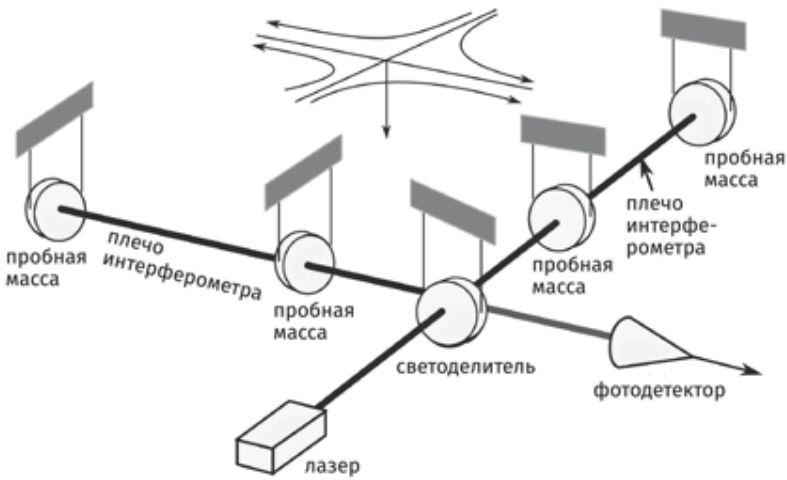
гравитационная волна приходит сверху, то вследствие того, что она сжимает и растягивает пространство, она делает один стержень совсем немного короче, а другой – чуть длиннее. В следующее мгновение происходит противоположное, и схема повторяется, пока волна активна. Вместо того чтобы пытаться обнаружить превращение единственного стержня в звенящий колокольчик, Вайсс должен был зарегистрировать попеременное изгибание двух стержней.

Эксперимент Вебера был в тысячи раз менее точен, чем необходимо для получения результата, и Вайсс знал, что должен добиться радикальных улучшений. Его осенила мудрая мысль использовать свет как линейку. Его «стержни» представляли собой длинные металлические трубки с откачанным изнутри воздухом, поскольку в вакууме свет распространяется с постоянной скоростью. Лазер в изгибе L-образной конструкции посылает свет одной длины волны через светоделитель, так что половина попадает в плечо интерферометра и другая половина – под прямым углом в другое плечо. Свет отражается от зеркала в конце каждого плеча, возвращается в изгиб L и вновь соединяется в детекторе. В норме световые волны возвращаются по обоим плечам интерферометра строго синхронно, их пики и спады совпадают. Если же через инструмент проходит гравитационная волна, один пучок света проходит чуть меньшее расстояние, пики и спады не совпадают, и интенсивность света снижается (илл. 57).

В теории все просто. Трудность представляет исключительная точность измерений. Мало того, что амплитуда колебаний пространственно-временного континуума очень мала – у них очень большая длина волны. Типичная частота гравитационных волн, возникших при столкновении черных дыр, составляет 100 Гц, то есть 100 колебаний в секунду. Однако типичная длина волны – 3000 км. Оптимальная длина плеч инструмента – четверть длины волны, поскольку от сдвига на четверть волны в том или ином направлении зависит, будет ли усилен или нейтрализован сигнал. Вайсс знал, что не может сделать вакуумную трубу длиной 750 км, но решением стало многократное отражение света в обе стороны в более короткой трубе. Вайсс описал свою идею в техническом предложении МТИ в 1972 г. Это, возможно, самая влиятельная статья, так и не опубликованная в научном журнале[341].

Начало пути было трудным. Вайсс приступил к работе над прототипом интерферометра с 1,5-метровыми плечами. Даже для такого прибора – в сотни раз меньше и дешевле любого работоспособного инструмента для регистрации гравитационных волн – он с трудом находил финансирование. Руководству затея

казалась сомнительной, а самый влиятельный его коллега, Филип Моррисон, был настроен глубоко скептически. В начале 1970-х гг. отсутствовали даже убедительные свидетельства того, что Лебедь Х-1 является черной дырой. Моррисон считал, что черных дыр не существует, а раз это самые мощные потенциальные источники гравитационных волн, Вайсс даром тратит время. Вайсс получил немного денег от военных, но и это финансирование обрубили с принятием поправки к Закону об ассигнованиях на военные нужды, запретившей военным поддерживать гражданские проекты.



Илл. 57. Схема конструкции лазерно-интерферометрической гравитационно-волновой обсерватории (LIGO). Гравитационная волна в данном изображении падает точно сверху вниз. Свет проходит через светоделитель и проходит по плечам длиной 4 км, после чего возвращается в фотодетектор, где два луча складываются. Пробные массы в каждом плече регистрируют прибытие гравитационной волны в форме очень небольших изменений длины плеча, которые фотодетектор записывает в виде интерференционной картины. *Калифорнийский технологический институт / МТИ / Лаборатория LIGO*

Летом 1975 г. Райнер Вайсс встречал в аэропорту им. Даллеса в Вашингтоне знаменитого физика-теоретика из Калтеха Кипа Торна – победителя в споре со Стивеном Хокингом о существовании черных дыр. Наука работает лучше всего, когда объединяются теория и наблюдения. Предсказания теории способствуют более эффективным наблюдениям, а наблюдения – более глубокому пониманию физических процессов. В тот душный день в Вашингтоне, когда экспериментатор Вайсс познакомился с одним из величайших теоретиков нашего

времени Торном, родился проект LIGO[342].

Вайсс пригласил Торна на собрание в штаб-квартире NASA по вопросам космических исследований в области космологии и теории относительности. «Я забрал Кипа из аэропорта жарким летним вечером, Вашингтон был полон туристов. Номер для него не забронировали, и он переночевал у меня, – вспоминал Вайсс. – Мы составили на листе бумаги огромную карту всевозможных областей изучения гравитации. За какой из них будущее? Что было будущим, чем следовало заняться?»[343] Они были так увлечены разговором, что не спали всю ночь.

Торн не читал техническую статью Вайсса, посвященную концепции интерферометра. Позднее он скажет: «Если бы я ее прочел, то, разумеется, не понял бы». На самом деле его авторитетный учебник «Гравитация» включает упражнение, призванное продемонстрировать невозможность регистрации гравитационных волн с помощью лазеров. «Я быстро изменил свое мнение», – признал Торн[344]. Он вернулся в Калтех, горя желанием построить интерферометр. Однако для начала нужно было привлечь к проекту физика-экспериментатора. Вайсс предложил Рона Древера из Университета Глазго. Древер поставил важнейшие эксперименты по гладкости пространства и массе нейтрино, соорудил и использовал антенну Вебера и сделал интерферометр с 10-метровыми плечами – в шесть раз больше скромного инструмента Вайсса в МТИ. Торн устроил Древера на полставки в штат Калтеха, и к 1983 г. он построил там интерферометр с 40-метровыми плечами, воспользовавшись оригинальными методами повышения мощности лазера и улучшив изоляцию от сейсмического шума.

Постепенно финансирование выросло, обострилась и конкуренция. В 1975 г. Вайсс получил маленький грант Национального научного фонда (ННФ) для начала работы над интерферометром. В 1979 г. группа ученых Калтеха во главе с Торном и Древером получила серьезный грант, а группа Вайсса из МТИ – сумму поскромнее. Калтех и МТИ – яростные соперники в науке[345]; и группа из Калтеха со своим 40-метровым интерферометром, разумеется, возглавила гонку. Обе группы мечтали о полноразмерном интерферометре километровых масштабов, но именно Вайсс поймал удачу за хвост, посетив Национальный научный фонд и предложив идею постройки интерферометра на двух площадках с ценником $100 млн. Проведенное в результате проектное исследование получило название «Синяя книга» – фактически это библия охотников за волнами пространственно-временного континуума[346].

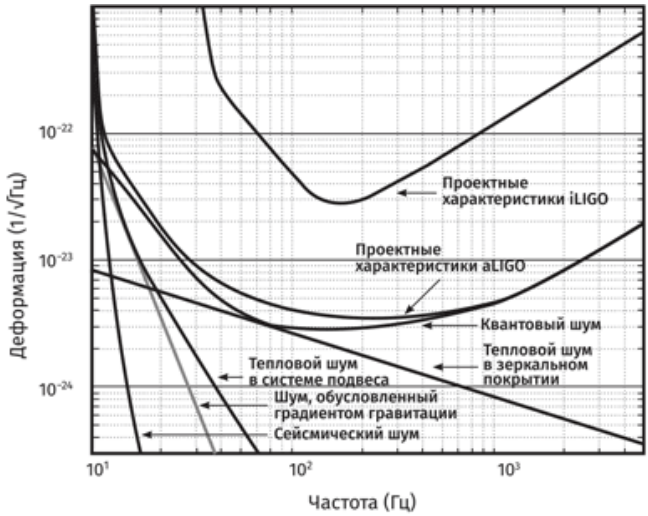
И Вайсс, и Древер были очень склонны к соперничеству.

Торну пришлось принять на себя роль посредника и миротворца. Поскольку ННФ заявил, что не будет поддерживать две отдельные группы, им пришлось пойти на вынужденный союз. Дело шло ни шатко ни валко. Постоянные задержки из-за технических проблем вынудили ННФ отменить финансирование[347]. К середине 1990-х гг. проект LIGO возродился, на сей раз во главе с физиком высоких энергий из Калтеха Барри Бэришем. Наука изобилует проектами, в которых одаренные ученые потерпели провал из-за отсутствия навыков общения и управления, но Бэриш оказался умелым руководителем.

Сначала было запланировано строительство двух одинаковых интерферометров с четырехкилометровыми плечами на разных концах США, в геологически спокойных местах. Одно – возле заглушенного ядерного реактора в кустарниковой полупустыне под Хэнфордом в штате Вашингтон, второе – в заболоченной местности возле города Батон-Руж в Луизиане. Целью первого этапа проекта, iLIGO (initial LIGO), было развитие технологии: обнаружение объектов представлялось крайне маловероятным. На второй стадии продвинутая обсерватория aLIGO (advanced LIGO) должна была стать достаточно чувствительной, чтобы зарегистрировать предсказанные теорией гравитационные волны (илл. 58). Бэриш хотел создать оборудование и инфраструктуру, все главные компоненты которых – вакуумные системы, оптика, детекторы и системы подвеса – можно было бы постоянно совершенствовать.

Чтобы сделать aLIGO намного более чувствительной, потребовалось усовершенствовать почти все составляющие эксперимента. Лазер сделали мощнее, чтобы устранить главный источник высокочастотного шума. Пробные массы на каждом конце каждого плеча стали более тяжелыми; груз представляет собой 40-килограммовый цилиндр из кремния с прикрепленным к нему зеркалом, спроектированный так, чтобы регистрировать крохотные изменения длины плеча. В качестве подвеса был использован четырехступенчатый маятник, изоляция и устранение помех на порядок улучшены. У LIGO – крупнейшая и лучшая в истории вакуумная система, включающая 48 км сварных соединений без утечек. Трубы такие длинные, что на метр поднимаются над поверхностью с каждой стороны – ввиду искривления поверхности Земли под ними. Чтобы компенсировать изгиб и обеспечить ровную укладку и нивелировку труб, бетон заливали и выравнивали с беспрецедентной точностью. Плотность вакуума составляет одну триллионную плотности воздуха на уровне моря. Датчики настолько чувствительны, что слышат срабатывание тормозов

грузовика на расстоянии 4,8 км – и гром на расстоянии 80 км. Более того, в своих зеркалах они видят движение отдельных атомов.



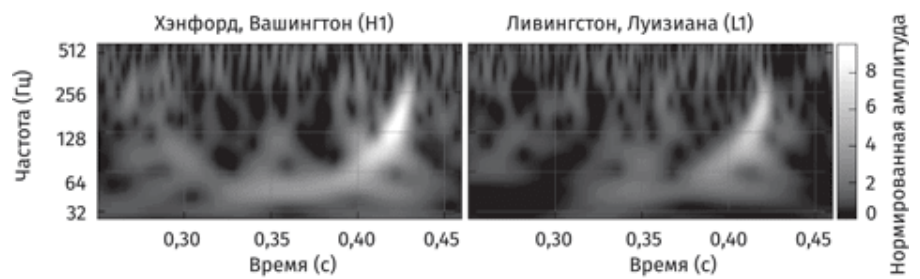
Илл. 58. Чувствительность лазерно-интерферометрической гравитационно-волновой обсерватории (LIGO). Это характеристика с точки зрения «деформации», примерно соответствующей относительному изменению длины пробной массы, когда гравитационная волна проходит непосредственно через нее. При низких частотах чувствительность сильно ограничена геологическим шумом и влиянием гравитации на зеркала, при высоких — квантовым шумом в детекторах. Продвинутая aLIGO чувствительнее первоначальной по меньшей мере в десять раз. *Научная коллаборация LIGO*

Этот эксперимент – вершина технического мастерства. Изначальная iLIGO функционировала с 2002 по 2010 г. и, как и ожидалось, не зарегистрировала гравитационные волны. Апгрейд до aLIGO занял пять лет, в работе участвовало 500 человек. Усовершенствованная aLIGO шесть месяцев проработала в опытном режиме и за четыре дня до начала сбора научных данных система нашла «золотую жилу».

Вернемся к Марко Драго и к утру 14 сентября 2015 г. В свободное от физики время этот учтивый постдок исполняет классическую музыку на фортепиано и пишет фантастические романы – два уже вышли. Увидев странные закорючки на своем мониторе, он заподозрил неладное. Это был классический рисунок слияния черных дыр, стремительное крещендо, которое ученые называют «чирп» – нечто вроде птичьего щебета

Вселенной. Спустя миллиард с лишним лет пути через космос волна прошла через Землю со скоростью света, задев детектор в вашингтонском Ливингстоне на 7 миллисекунд раньше, чем детектор на другом конце страны, в луизианском Хэнфорде (илл. 59). Драго был настроен скептически, потому что сигнал выглядел слишком сильным, слишком совершенным: «Никто не ждал ничего настолько колоссального, поэтому я предположил, что это вброс»[348]. Кураторы LIGO держали сотрудников в тонусе, периодически вводя в поток данных ложные сигналы, называемые слепыми вбросами. В 2010 г. слепой вброс вызвал ажиотаж, была написана статья, и, когда команда уже готова была предложить ее к публикации, сообщили, что сигналы были ложными.

Драго не пожалел сил, чтобы все перепроверить. Он обзвонил остальные площадки и переговорил с руководителем группы, чтобы убедиться, что никто не вбрасывал сигнал в систему. Он даже переживал, что систему могли взломать. После десятка автоматических и ручных проверок не осталось сомнений, что за этот сигнал отвечает Вселенная. Он выделялся на фоне шума, как взрыв смеха в комнате, полной болтающих людей. Гравитация подала голос.



Илл. 59. GW150914, первое зарегистрированное гравитационное событие в истории. Классический «чирп» — рисунок слияния черных дыр, показан на графике амплитуды и частоты гравитационной волны. Сигнал поступил на детектор LIGO в Хэнфорде за 7 миллисекунд до прибытия на детектор LIGO в Ливингстоне, что соответствует расчетному времени движения гравитационных волн между этими двумя точками. *Научная коллаборация LIGO / Физический институт*

Познакомьтесь с мастером гравитации

Ведущий мировой теоретик в области гравитации когда-то мечтал стать водителем снегоуборочной машины. В детстве Кип Торн был на «ты» с буранами и горами. «Если вырос в Скалистых горах, то это самая роскошная работа, какую можно себе представить. Но однажды мать взяла меня на лекцию о

Солнечной системе, и я попался»[349]. Торн вырос в семье мормонов в консервативном штате Юта, но теперь он – атеист. Но родители были преподавателями, поэтому поощряли его любопытство.

Карьера Торна быстро развивалась. Получив ученые степени в Калтехе и Принстоне, он вернулся в Калтех, где стал одним из самых молодых штатных профессоров. Он уехал из Юты тощим эксцентричным мормоном, прячущим стеснительность за бородой библейского пророка, а к 30 годам стал мировым экспертом по гравитационной астрофизике и теперь отдавал предпочтение джинсам, черному кожаному пиджаку и хипстерской эспаньолке.

Торн писал диссертацию в Принстоне под руководством Джона Уилера[350]. Уилер поставил интересный вопрос: схлопнется ли цилиндрический пучок линий магнитного поля под воздействием собственной силы гравитации? Линии магнитного поля отталкиваются друг от друга, и после сложных расчетов Торн доказал, что схлопывание цилиндрического магнитного поля невозможно. Это повлекло другой вопрос: почему тогда сферические звезды, также пронизанные линиями магнитного поля, могут схлопнуться и стать черными дырами? Торн показал, что только действуя во всех направлениях гравитация способна преодолеть внутреннее давление. Представьте себе обруч, при раскручивании очерчивающий сферу. Любое сжимающееся тело массой *M может стать черной дырой только при условии*, что вокруг него можно раскрутить обруч с окружностью $4?GM / c^2$ (где G – гравитационная постоянная, а c – скорость света). Гипотеза обруча сделала Торна суперзвездой, едва он окончил аспирантуру.

В середине своего четвертого десятка Торн стал соавтором эпохального учебника «Гравитация» и начал череду пари со Стивеном Хокингом. Сооснователь LIGO, Торн проявлял огромный интерес к открытиям гравитационных волн. Он знал, что гравитационные волны с наиболее ярко выраженными характеристиками порождаются слиянием двух черных дыр. Проблема заключалась в том, что рассчитать наимощнейшую часть сигнала перед самым слиянием можно только с помощью компьютеров, поскольку, как и со многими ситуациями в общей теории относительности, уравнения не имеют точного решения. Однако в те времена компьютерное моделирование было чрезвычайно несовершенно.

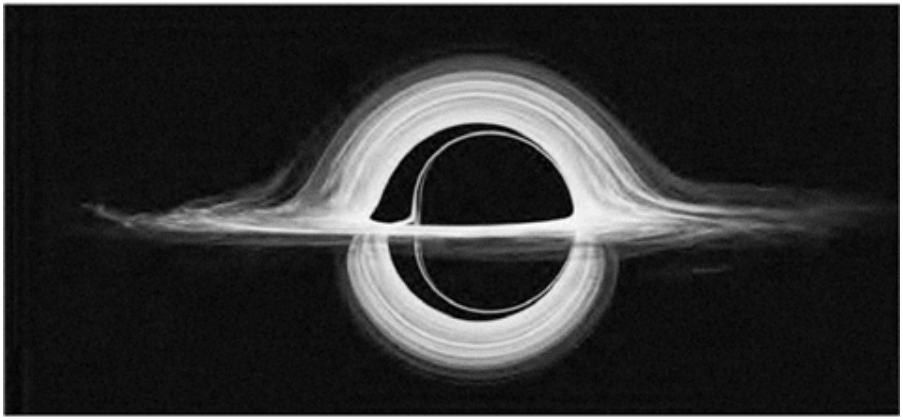
Мы были убеждены, что должны располагать результатами компьютерного моделирования к моменту, когда, возможно, начнем видеть гравитационные волны с помощью LIGO. Но в 1990-х гг. в этой области имелись огромные проблемы.

Выдающиеся специалисты по теории вычислений могли столкнуть две черные дыры лоб в лоб, но, когда они пытались заставить черные дыры совершать орбитальное движение относительно друг друга, как это происходит в природе, компьютеры отрубались до завершения первого же оборота. К 2001 г. я встревожился, потому что предполагал, что продвинутая LIGO будет готова к началу 2010-х гг., через десятилетие. Было совершенно не очевидно, что к тому времени моделирование будет доступно[351].

Поэтому Торн отвлекся от текущего управления проектом и организовал в Калтехе и Корнелле группу по численному релятивистскому моделированию.

Торн – талантливый популяризатор науки. Он умеет объяснить доступным языком головоломные идеи[352]. Будучи публичным представителем LIGO, он смог убедить профессиональных политиков, не имеющих научной подготовки, потратить почти миллиард долларов на постройку двух огромных устройств, созданных для регистрации гипотетических невидимых волн – настолько слабых, что они способны лишь сдвинуть атомы на крохотные доли их величины.

Благодаря близости к Голливуду Торн привлекался к проектам, где главную роль получала гравитация. В начале 1980-х гг. Карл Саган свел его с продюсером Линдой Обст и использовал его опыт для изображения путешествия через кротовую нору в фильме «Контакт». Обст вспомнила о нем, работая над «Интерстеллар» с режиссером Кристофером Ноланом. В фильме гигантская вращающаяся черная дыра Гаргантюа замедляла время, и Торн помог аниматорам добиться научной точности ее изображения. Визуализация некоторых кадров потребовала 100 часов работы, данные для фильма почти достигли миллиона гигабайт. Благодаря моделированию Торн даже совершил научное открытие, которому посвятил несколько статей[353]. Он считает, что картина получилась красивой, но убежден, что она красива в том числе потому, что правдива (илл. 60).



Илл. 60. Художественное изображение сверхмассивной черной дыры Гаргантюа в фильме 2014 г. «Интерстеллар». В действительности деформации аккреционного диска, наблюдаемого со столь близкого расстояния, были бы еще сильнее. В фильме черная дыра дает астронавту возможность путешествовать во времени и пространстве и спасти людей на Земле. Планета Миллер (вверху слева) — это мир-океан, настолько близкий к черной дыре, что время там сильно замедляется. *О. Джеймс / Физический институт*

Взгляд на Вселенную глазами гравитации

Почти ежедневно через ваше тело проходит волна пространства-времени, возникшая в результате слияния черных дыр где-то во Вселенной. Она может прийти сверху, сбоку или из-под ног. Вы занимаетесь своими делами, не подозревая о вторжении. Когда волна прокатывается через вас, вы на миг становитесь чуточку выше и тоньше, затем чуточку ниже и толще, и картина повторяется. Через несколько десятых долей секунды вы вернетесь к обычному состоянию.

Это заставляет вспомнить слова романиста и поэта Джона Апдайка, сказанные в адрес другого призрачного посланца космоса, нейтрино[354]:

…Они по всей Вселенной шпарят,
Не поступаясь прямизной.
Для них пустой надутый шарик –
Трилльоннотонный шар земной.
Ничто не сдвинув и не тронув,
Они проходят сквозь него –
Так сквозь стекло скользят фотоны,
Так пыль проносит сквозняком.

Ни стен для них, ни пьедесталов.
Они способны осадить
Холодную закалку стали
И жаркой меди звон и прыть.
Они летят таким карьером,
Что и не снился жеребцам,
Поверх всех классовых барьеров
Вторгаясь в тело мне и вам.
Их суд немыслимо высокий,
Их приговор неотвратим,
Он шлет на головы потоки
Неощутимых гильотин…[355]

Гравитационные волны бывают трех типов[356]. Первые – стохастические, этот термин описывает любой физический процесс случайного характера. Волны этого типа труднее всего зарегистрировать, поскольку сигнал может перекрываться случайным шумом электроники на высоких частотах и геологической активностью на низких. Самым впечатляющим из стохастических сигналов, как мы скоро узнаем, был бы сигнал Большого взрыва. Вторые – периодические, это гравитационные волны, частота которых почти постоянна долгое время. Чаще всего источниками периодических сигналов являются нейтронные звезды и черные дыры, совершающие орбитальное движение по отношению друг к другу. Поскольку партнеры в двойных системах удалены друг от друга, сигналы слабы. Третьи – импульсные, гравитационные волны, которые приходят короткой вспышкой. Импульсы возникают вследствие формирования черной дыры во взрыве сверхновой, а также слияния нейтронных звезд или черных дыр. Предположительно это самые сильные из гравитационных волн, и образ их весьма специфичен, поэтому их проще всего отличить от шума.

Столкновение черных дыр можно интерпретировать как колокольный звон гравитации. Большой колокол звучит ниже маленького, а большие массы при столкновении излучают волны более низких частот, чем маленькие. Нейтронные звезды на максимуме выдают «чирп» до 1600 Гц, черные дыры минимальной массы – до 700 Гц, а массивные черные дыры, столкновение которых было зарегистрировано LIGO в качестве первого события, начинали со 100 Гц и поднялись примерно до 350 Гц. Нейтронных звезд примерно в три раза больше, чем черных дыр, поэтому мы ожидаем увидеть (в порядке уменьшения количества событий, но увеличения силы сигнала): слияния двух нейтронных звезд,

слияния нейтронной звезды и черной дыры и слияния двух черных дыр. Детектор LIGO спроектирован так, чтобы быть наиболее чувствительным к диапазону частот 100–200 Гц, в котором самый сильный сигнал издают сливающиеся черные дыры. Этот интервал идеален для наблюдений. На 100 Гц чувствительность в два раза ниже, поскольку усиливаются помехи от электроники, а на 20 Гц – в десять раз ниже из-за усиления геологических шумов Земли.

Какую информацию дает нам волна пространственно-временного континуума? Давайте сравним ее с волнами на воде. Представьте, что вы – поплавок в большом пруду в ветреный день. Из-за ветра поверхность воды идет рябью, случайный рисунок волн, заставляющих вас подниматься и опускаться, весьма похож на фоновый шум в эксперименте по поиску гравитационной волны. Если кто-то в течение нескольких секунд будет с интервалом в секунду бросать в пруд камни, вы почувствуете дополнительную – периодическую – качку. Это «чирп» двух соединяющихся черных дыр. Размах движения зависит от величины камней и от расстояния от вас до места, куда их бросают, поскольку по мере распространения волны слабеют. У поплавка нет глаз и ушей, и вы чувствуете только движение, вы понятия не имеете, откуда идут волны. Однако, если бы вы могли поговорить с другим, соседним поплавком, вы получили бы больше информации. Волны распространяются концентрическими кругами, и время получения этих двух сигналов позволяет вычислить направление источника методом триангуляции. Именно так ваши уши определяют, откуда доносится звук.

В процессе обнаружения волн посредством LIGO физики получают много важной информации[357]. Рисунок изменения частоты дает массы двух черных дыр путем сравнения с результатами моделирования. Фаза слияния используется для определения вращения образующейся в результате черной дыры. Координаты события в небе определяются разницей во времени поступления сигналов в два детектора (то, что одинаковый сигнал наблюдается в обеих точках, помогает исключить помехи или ложный источник). Если точек всего две, ограничения на положение источника в небе не слишком строги: он может находиться где угодно в пределах широкой полосы. Однако успех LIGO вдохновил международное сообщество. Европа недавно ввела в эксплуатацию интерферометр в Италии (Virgo), а скоро введет и в Германии (GEO600). В 2019 г. закончено строительство интерферометра в Японии, еще один планируется запустить в Индии в начале 2020-х гг. Регистрация в трех или более точках позволит сузить область происхождения гравитационных волн до

определенного астрономического источника и, следовательно, наблюдать его во всем электромагнитном спектре[358].

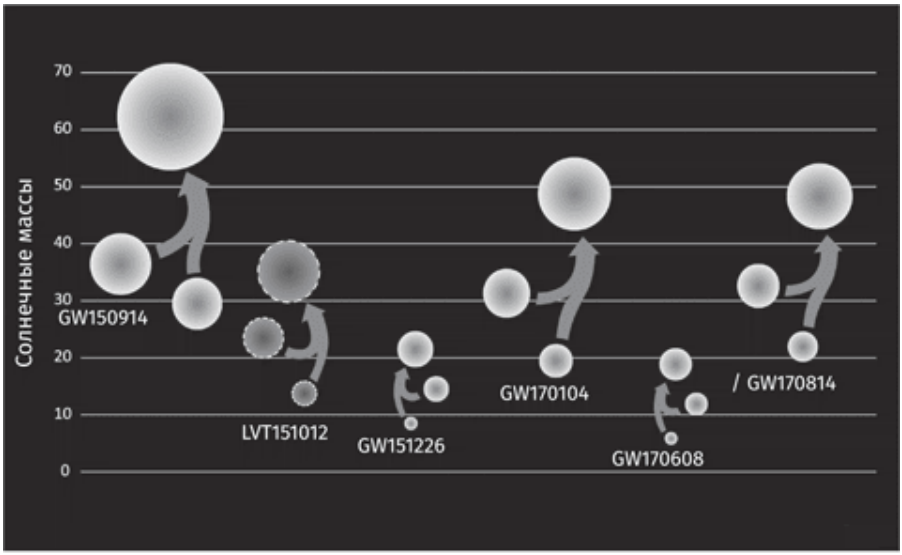
Расстояние до источника оценивается по силе сигнала. Волны расходятся от черной дыры в трех измерениях и слабеют, распространяясь в космосе. Гравитационные волны имеют огромное преимущество перед электромагнитными: их амплитуда обратно пропорциональна расстоянию. Если черные дыры в десять раз дальше, то сигнал в десять раз слабее. Астрономы не могут измерить амплитуду электромагнитной волны; они измеряют интенсивность – квадрат амплитуды, и если звезда в десять раз дальше, то интенсивность световой волны в 100 раз меньше. Поэтому LIGO, читая гравитационные волны, имеет огромный охват и может регистрировать катаклизмы, произошедшие в миллиардах световых лет от нас.

Но не был ли успех LIGO случайным? Невозможно набрать статистику на одном событии. Что, если Вселенная лишь чуть приоткрыла свои тайны, спев нам короткую песенку? Восторг физиков сменился тревогой. Они искали утешение в словах Эйнштейна: в какой-то момент в 1921 г., когда казалось, что общая теория относительности опровергнута экспериментом, он изрек: «Господь изощрен, но не злонамерен».

С восторгом и невероятным облегчением команда LIGO объявила, что 26 декабря 2015 г. было зарегистрировано второе событие. Сигнал был слабее, потому что источник находился несколько дальше, на расстоянии 1,5 млрд световых лет, также это было вызвано меньшими массами черных дыр – 9 и 14 солнечных масс вместо 29 и 36, как в первом событии. Событие с промежуточной датой, 12 октября, получило статус неподтвержденного кандидата. Оно было слабым, поскольку его участники – черные дыры в 13 и 23 солнечные массы – слились вскоре после того, как на Земле зародилась жизнь, на колоссальном удалении 3,3 млрд световых лет[359]. В 2017 г. LIGO зарегистрировала еще три события (илл. 61). Пять подтвержденных событий и одно вероятное – тысяча физиков ликовала. LIGO – оглушительный успех. Это начало эры гравитационно-волновой астрономии[360].

В августе 2017 г. LIGO зарегистрировала еще одну пульсацию гравитационных волн. Это событие имело два отличия от предыдущих. Сигнал был слабее, и его источник находился лишь в 130 млн световых лет. Это значит, что сигнал возник при слиянии менее массивных объектов – нейтронных звезд, а не черных дыр[361]. LIGO работала совместно с европейским интерферометром Virgo, и сигналы трех разных детекторов позволили ученым с беспрецедентной точностью определить,

откуда именно пришли гравитационные волны. Нейтронные звезды слились в галактике NGC4993. Обсерватории мира включились в работу.



Илл. 61. Регистрации первого научного запуска лазерно-интерферометрической гравитационно-волновой обсерватории aLIGO. Первое событие зарегистрировано 14 сентября 2015 г., всего через несколько дней после того, как LIGO после долгого отключения стала получать научные данные. В 2015 г. зарегистрировали еще два события, за ними последовали три в 2017 г. Второе событие (круги пунктирными линиями) считается вероятным и неподтвержденным, поскольку соотношение сигнала и шума было ниже порогового. *Научная коллаборация LIGO*

В результате было получено огромное количество данных, и родилась астрономия нового типа. Два спутника NASA зарегистрировали выброс гамма-лучей от слияния нейтронных звезд, и свыше 70 телескопов по всему земному шару поймали затухающее оптическое и инфракрасное свечение, возникшее вследствие столкновения. В отличие от слияния черных дыр, при котором не возникает электромагнитного излучения, нейтронные звезды сливаются во взрыве, который в тысячу раз мощнее сверхновой. Как следствие мы имеем выброс излучения и поток нейтронов, приведших в движение облако радиоактивных продуктов[362]. За один день облако разрослось от размеров большого города до размеров Солнечной системы. Нейтроны внедрились в ядра атомов и превратили их в ядра более тяжелых элементов. По оценкам теоретиков, при событии образовалось

200 земных масс золота – на 10^{31}, если бы вы их заполучили! Наблюдение за гравитационными волнами сопоставлялось с исчерпывающей информацией об электромагнитных излучениях, и это направление было названо многосигнальной астрономией. Предполагается, что LIGO и Virgo примерно раз в неделю будут наблюдать слияние нейтронных звезд и раз в две недели – слияние черных дыр[363]. Космос бурлит волнами пространственно-временного континуума, а астрономы наконец обрели глаза, чтобы это видеть.

Награда недолго ждала героев. Часто случается так, что между открытием и присуждением его авторам Нобелевской премии проходит много времени. Некоторые выдающиеся ученые умерли, так этого и не дождавшись, а посмертно премия не присуждается. Не приходилось, однако, сомневаться, что регистрация гравитационных волн быстро получит признание. И неудивительно, что в октябре 2017 г., менее чем через два года после того, как LIGO впервые ощутила волнение пространственно-временного континуума, Райнер Вайсс, Кип Торн и Барри Бэриш были объявлены лауреатами Нобелевской премии по физике.

Столкновения и слияния массивных черных дыр

Теперь, по обнаружении колебаний пространственно-временного континуума, мы ожидаем следующего. В Млечном Пути миллиард нейтронных звезд и 300 млн черных дыр – множество кандидатов на слияние. Однако вероятность того, что они входят в тесно связанные двойные системы, очень мала, поэтому слияние черных дыр происходит примерно раз в 500 000 лет. Долго придется ждать! Впрочем, чувствительность LIGO обеспечивает громадный охват в масштабах Вселенной. Когда усовершенствованная LIGO вновь заработает в 2020 г., она будет в три раза чувствительней, следовательно, сможет уловить сигнал с расстояния, в три раза большего[364]. Она измерит невероятно слабые сдвиги – на какие-то доли 10^{22}. Поскольку объем пропорционален кубу расстояния, количество объектов вырастет в 30 раз. Возможно, будет регистрироваться до 1000 событий в год, или по два ежедневно[365].

Другой режим исследования – это гравитационные волны, излучаемые при проглатывании сверхмассивной черной дырой, находящейся в центре галактики, компактного тела – например, нейтронной звезды или черной дыры звездной массы. Снова проведем аналогию со звуком: чем массивнее черные дыры, тем продолжительнее орбитальное время при их слиянии и тем ниже частота специфического «чирпа». Сверхмассивное тело «звучит»

в интервале частот от 10^{-4} Гц до 1 Гц, орбитальное время составляет от нескольких часов до нескольких секунд. Сигналы сверхмассивной черной дыры будут ниже порога слышимости человека и даже ниже самой низко звучащей трубы органа; такие звуки скорее ощущаются, чем воспринимаются на слух.

Из-за столь низкого интервала частот детектор, который регистрирует гравитационные волны, исходящие от самых массивных черных дыр, должен находиться в первозданной среде космоса. Предполагаемым инструментом для решения этой задачи является лазерно-интерферометрическая космическая антенна (LISA). Это будет «созвездие» из трех спутников, образующих равносторонний треугольник со стороной миллион километров[366]. Установка, в десять раз превышающая размер орбиты Луны, будет обращаться вокруг Солнца на том же расстоянии от него, что и Земля, но с отставанием 20 градусов. На основном спутнике будут размещены лазер и детектор, на двух других, вспомогательных, – отражатели, прикрепленные к пробным массам из сплава золота и платины. LISA создана для измерений смещений менее размера атома на расстоянии 1 млн км, или с точностью 1 из 10^{21}. Чтобы зарегистрировать крохотные колебания пространственно-временного континуума, пробные массы должны быть защищены от воздействия любой силы, кроме гравитации, словно бы они не были частью космического аппарата и просто «свободно падали» на орбите Земля – Солнце. Решение этой инженерной задачи требует безупречного контроля над космическим кораблем. Каждый аппарат должен парить вокруг своей пробной массы, определяя свое положение относительно него с помощью емкостных сенсоров и точными микродвигателями поддерживая идеальную центровку по массе. В 2016 г. испытательная миссия ЕКА LISA *Pathfinder* доказала работоспособность технологии. Благодаря успеху LIGO в 2017 г. были приняты обязательства по финансированию проекта, и теперь у LISA блестящие перспективы[367].

Согласно стандартной космологической модели, структуры строятся иерархически, путем слияния меньших тел и поглощения окружающей материи. Так, карликовые галактики, объединяясь, создают большие галактики, а те продолжают расти – как за счет объединения с более многочисленными карликовыми галактиками, так и за счет газа, попадающего из межгалактического пространства. Центральные черные дыры следуют тому же процессу роста, но трудно предсказать подробности, потому что он зависит от сложного процесса аккреции и особых условий в центре галактик[368].

Слияния сверхмассивных черных дыр происходят еще

медленнее и, соответственно, излучают гравитационные волны меньшей частоты. Исходя из примерных расчетов, пара черных дыр в миллион солнечных масс должна при слиянии излучать гравитационные волны частотой 10^{-3} Гц в течение часа; при массах в миллиард солнечных частота гравитационных волн составит 10^{-9} Гц, а временная шкала растянется на десятки лет. Чтобы поймать волну, странствие которой займет годы, детектор должен быть исключительно стабильным. Основательное компьютерное моделирование говорит о том, что LISA будет регистрировать несколько слияний в год – в основном ситуации, когда обе черные дыры в 10^6–10^7 раз массивнее Солнца. Такая выборка позволит нам взглянуть на ранний этап формирования черных дыр и галактик[369].

Однако самые громкие события и самые зрелищные слияния – с участием черных дыр в миллиард солнечных масс – порождают волны исключительно низких частот, недоступных для LISA. Даже система телескопов длиной миллион километров будет слишком малой, чтобы обнаружить эти гравитационные волны; нужен инструмент размером с галактику. И теперь мы знакомимся с системой тайминга пульсаров. Пульсары – это мертвые коллапсировавшие звезды, состоящие только из нейтронов. При осевом вращении горячие точки на их поверхности проходят через зоны обзора радиотелескопов, и радиоимпульсы поступают с идеально точным временным интервалом. Пульсары, совершающие сотни оборотов в секунду, представляют собой самые точные часы во Вселенной.

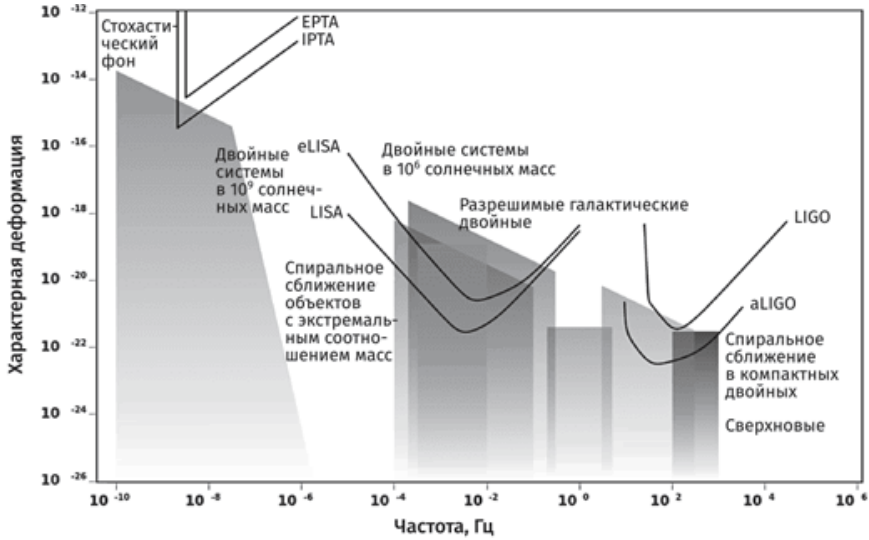
В миллиардах световых лет от нас две сверхмассивные черные дыры неторопливо кружатся в танце, продолжающемся несколько миллионов лет. Когда они наконец падают друг другу в объятия и сливаются, они омывают Вселенную низкочастотными гравитационными волнами, сжимающими и растягивающими ткань пространства-времени. Как и мы на Земле, пульсары покачиваются на этих волнах, распространяющихся со скоростью света. Волны слегка меняют пульсарный ритм. Например, волна частотой 10^{-8} Гц, что означает один цикл за четыре месяца, заставит импульсы приходить на 10 наносекунд раньше в январе и на 10 наносекунд позже в марте. Это ювелирная работа, но современные радиотелескопы способны измерять импульсы с требуемой точностью. Массивы пульсаров используются для повышения чувствительности эксперимента и дают некоторую чувствительность к направлению распространения сигнала[370].

Система тайминга пульсаров – самый грандиозный эксперимент в истории науки. Это не 4 км LIGO или 1 млн км LISA – пульсары-детекторы разнесены на тысячи триллионов

километров. Детектором является вся галактика Млечный Путь. Это поистине Большая наука. Четыре массива пульсаров активно ищут сигналы, и их данные объединяются во всемирный массив. По мере добавления пульсаров в списки объектов наблюдения и увеличения чувствительности вероятность того, что в ходе одного или нескольких экспериментов в ближайшее десятилетие будут зарегистрированы слияния сверхмассивных черных дыр, увеличивается до 80 % (илл. 62)[371].

Гравитация и Большой взрыв

Регистрация первичных гравитационных волн – это пока неосвоенные области науки. Как вы помните, волны пространственно-временного континуума возникают всякий раз, когда масса меняет его движение или конфигурацию. Беспрецедентные масштабы изменения массы происходили в ранней Вселенной, когда материя, впоследствии сформировавшая сотни миллиардов галактик, занимала пространство размером меньше атома. Современная космология включает так называемую инфляцию – раннюю фазу экспоненциального роста Вселенной, тогда еще микроскопической, через 10^{-35} секунд после Большого взрыва. Инфляцией объясняют непонятную в ином случае равномерность и гладкость Вселенной[372]. Инфляция предполагает, что «зародыши» галактик были квантовыми флуктуациями.



Илл. 62. Сравнение детекторов и режимов регистрации гравитационных волн. Справа, в области высоких частот, показаны кривые чувствительности таких интерферометров, как LIGO, способных воспринимать сверхновые и слияния компактных двойных систем из нейтронной звезды и черной дыры. В середине представлены интерферометры космического базирования типа LISA, регистрирующие низкочастотные события — например, слияния двойных систем массивных черных дыр. Слева — системы тайминга пульсаров, ориентированные на низкочастотные события, такие как слияния сверхмассивных черных дыр и стохастический фон Большого взрыва. *C. Moore, R. Cole, and R. Berry, Classical and Quantum Gravity, vol. 32 / Физический институт*

Теория инфляции поддерживается рядом косвенных свидетельств, но энергия в то время была в триллионы раз выше, чем можно достичь в лаборатории или в ускорителях – таких как Большой адронный коллайдер, поэтому мы не можем воспроизвести ее экспериментально на Земле. Важно протестировать теорию инфляции, потому что это приблизит нас к Священному Граалю теории квантовой гравитации. Гравитационные волны, вызванные инфляцией, должны до сих пор сотрясать Вселенную. Их энергия распределена по частотам, различающимся на 29 порядков, что позволяет применить все рассмотренные нами методы регистрации[373]. Однако эти волны слишком слабы, чтобы их можно было измерить интерферометрами или системами тайминга пульсаров, поэтому астрономы сосредоточились на их следах в заполнившем Вселенную излучении – когда она остыла настолько, чтобы смогли образоваться стабильные атомы. Это излучение

распространяется во Вселенной в неизменном виде с момента спустя 400 000 лет после Большого взрыва, и мы наблюдаем его в микроволновом диапазоне. Растяжение и сжатие пространства, согласно предсказанию теории, должно было оставить в микроволновом излучении слабый вихревой узор[374].

В 2014 г. научное сообщество пребывало в напряжении: группа, работающая с телескопом Южного полюса, объявила об обнаружении гравитационных волн, вызванных инфляцией, – не непосредственно, а по специфическому следу в излучении[375]. Восторги утихли через несколько месяцев, когда выяснилось, что группу исследователей ввел в заблуждение загрязняющий сигнал пыли Млечного Пути. Для ученых опыт оказался болезненным: ведь исследователи тщательно проверили данные, но были обмануты слабым шумом переднего плана, словно приняли туман на стеклах очков за далекий буран. Во Вселенной много беспорядочного и неоднозначного, ее невозможно контролировать, как лабораторный эксперимент, и космологам стоит быть осмотрительными. Однако в конкуренции с другими группами трудно противиться соблазну как можно быстрее опубликовать сенсационную статью.

Несколько команд готовится к новой попытке провести эти важные измерения. Лучшие места для сложных наблюдений за микроволновым излучением находятся у Южного полюса и в безводной пустыне Атакама в Чили. В гонке участвует пять команд. Ставки высоки. Если признаки гравитационных волн не будут обнаружены, пошатнется краеугольный камень космологии. Но если они *будут* обнаружены, это станет прямым свидетельством квантовой гравитации.

Квантовое происхождение Вселенной может говорить о том, что мы живем в мультивселенной, где населяем один из потенциально бесконечного количества пространственно-временных пузырей. Вселенные в мультивселенной представляют собой отдельные пространственно-временные континуумы, по всей видимости, ненаблюдаемые из нашего пространственно-временного континуума, поэтому эту догадку трудно проверить. Возможно, они имеют разные законы физики и даже до неузнаваемости отличаются от нашей Вселенной. Действуют ли в них те же фундаментальные силы? Есть ли в них черные дыры? Имеются ли формы жизни, способные постичь свою вселенную? Вот некоторые из непостижимых вопросов, возникающих в авангарде космологии.

8. Судьба черных дыр

Жизнь черных дыр – это краткий период роста и длительное испарение. Наши далекие предки смогут увидеть ослепительное превращение центра нашей Галактики в квазар и слияние сверхмассивных черных дыр нашего Млечного Пути и галактики Андромеды. Постепенно черные дыры достигнут максимального размера, а новые образовываться не будут. Жизнь, возможно, сумеет уцелеть во Вселенной даже в будущую эру тьмы, но окончательная победа сил диссипации и распада станет для нее серьезнейшей угрозой.

В настоящее время, однако, черные дыры дают нам возможность подвергнуть теорию гравитации решающей проверке. Стремление объединить квантовую теорию и общую теорию относительности привело к разработке гравитации многомерного пространственно-временного континуума. Три привычных пространственных измерения служат лишь намеком на дополнительные скрытые измерения. Черные дыры должны быть включены в эту новую схему.

Новая эпоха изучения гравитации

Почему гравитация является такой слабой? Этот вопрос кажется абсурдным, особенно в дни, когда трудно встать с кровати, – тут следует вспомнить, как маленький магнит поднимает скрепку, побеждая увлекающую ее вниз силу притяжения всей Земли. Гравитация намного слабее трех других фундаментальных сил, попытка объяснить этот простой факт уводит нас через кроличью нору в скрытые измерения и множественные вселенные.

Как мы видели, физики уже допускали, что четыре фундаментальные силы могут проявляться как единая суперсила при достаточно высоких температурах или энергиях. Объединение двух из четырех сил наблюдалось в ускорителях частиц в 1970-е гг. и ознаменовалось присуждением нескольких Нобелевских премий. Следуя этим путем, ученые пришли к идее суперсимметрии. В обыденном мире частицы с полуцелыми спинами – такие, как электроны и кварки (класс фермионов), – не взаимодействуют с частицами с целым спином – например, фотонами и глюонами (класс бозонов)[376]. Для субатомных частиц спин является умозрительным математическим свойством, а не прямой аналогией вращения волчка или планеты. Фермионы и бозоны столь же чужды друг другу, как масло и вода.

Суперсимметрия объединяет эти категории, предсказывая множество «теневых» частиц у каждого фермиона и бозона, причем утверждается, что все силы, кроме гравитации, сливаются в одну силу при чудовищной температуре – 10^{29} кельвинов. Теоретики дошли до суперсимметрии в погоне за мечтой о единстве, лежащем в основе великого множества различных субатомных частиц. Однако идея суперсимметрии была поставлена под сомнение, поскольку никаких признаков существования этих теневых частиц не наблюдалось даже в экспериментах в Большом адронном коллайдере.

Второе наступление на концепцию объединения сил началось в 1980-х гг. – посредством теории струн. Теория струн ловко обходит проблемы стандартной модели физики частиц, выдвигая гипотезу о том, что частицы не являются фундаментальными, а представляют собой режимы колебаний крохотных одномерных объектов, названных струнами. Увлечение теорией струн распространилось в сообществе физиков-теоретиков как лесной пожар. Теория опирается на очень точную математику и естественным образом объединяет гравитацию с тремя другими силами. Однако после десяти с лишним лет интенсивных исследований многие физики разочаровались в ней. Ее математика очень сложна и часто не проверяема, требует наличия у пространственно-временного континуума девяти измерений – на целых пять больше, чем нужно! В теории струн «скрытые» измерения реализуются лишь при невероятно высокой температуре – 10^{32} кельвинов или в невероятно маленьком масштабе – 10^{-35} м. Создавалось впечатление, что теория не проверяема[377].

Познакомимся с Лизой Рэндалл. В детстве она увлеклась математикой, поскольку любила точные ответы. Она была первой девушкой-капитаном математической команды своей школы – Стайвесант, Нью-Йорк – и одноклассницей видного теоретика струн Брайана Грина. В 18 лет она победила на конкурсе научных талантов памяти Вестингауза с проектом Гауссовых целых чисел. Получив докторскую степень в Гарварде, она перебралась на другой берег реки, в МТИ, где стала адъюнкт-профессором и восходящей звездой теоретической физики.

Лизу Рэндалл увлекает не только математика, но и музыка. В мире не так много опер, на создание которых вдохновила теоретическая физика. Представителя этого научного направления может воодушевить даже идея оперы-буфф, например «Эйнштейн на пляже» Филипа Гласса. Лиза Рэндалл пополнила этот скудный репертуар. «Гипермузыкальный пролог: проективная опера в семи планах» была написана испанским

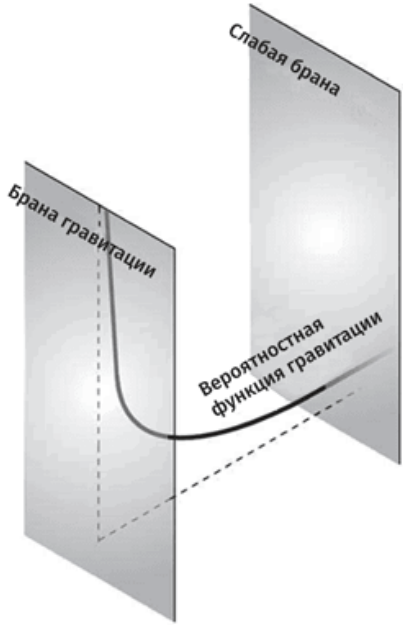
композитором Гектором Паррой на ее либретто.

Чтобы понять, что побудило Лизу Рэндалл творчески подойти к гравитации, вернемся к запутанной проблеме сингулярностей. Согласно общей теории относительности, каждая черная дыра содержит сингулярность, где искривление пространственно-временного континуума бесконечно[378]. Оказавшись внутри черной дыры, уравнения Эйнштейна «садятся в лужу» и предсказывают нечто бессмысленное с точки зрения физики. Стивен Хокинг доказал, что сингулярности – обязательный элемент черной дыры, и эффектно сформулировал проблему: общая теория относительности содержит зерна собственного разрушения.

Вариант выхода из тупика предлагает теория струн. Она возникла как следствие ряда проблем фундаментальной физики. Одна из проблем – объединение сил природы в одной схеме. «Гладкая» теория искривленного пространственно-временного континуума не согласуется с «зернистой» теорией субатомных частиц. Поиск квантовой гравитации десятилетиями приводил Эйнштейна в замешательство. Кроме того, успешная в целом Стандартная модель физики частиц имеет недостаток. У электронов в этой модели – нулевой размер, следовательно, они должны иметь бесконечную плотность вещества и бесконечную плотность заряда – еще один пример сингулярностей, словно нарушающих законы физики. Мы пока не можем объяснить, почему существует так много элементарных частиц с разными массами, материя преобладает над антиматерией, а темная материя и темная энергия являются двумя главными составляющими Вселенной[379].

Рэндалл знала, что теория струн в ходе исследований 1990-х гг. привела к открытию многообразия бран. Брана – сокращение от «мембрана» – это тело меньшей размерности в многомерном пространстве. Представьте лист бумаги, являющийся двумерным объектом в трехмерном пространстве. Муравьи, ползающие по листу бумаги, могут перемещаться только в двух измерениях: они не подозревают о третьем. Возможно даже существование другого листа бумаги, по которому ползают муравьи, не знающие о параллельной «вселенной» рядом с ними в третьем измерении. Подобным образом наша Вселенная может быть браной, трехмерным островом в океане пространства большей размерности. К бране привязаны частицы, но не гравитация, поскольку, согласно общей теории относительности, гравитация должна существовать в полной геометрии пространства. Рэндалл увидела в этом возможность объяснения удивительной слабости гравитации.

Несколько лет Рэндалл отвергала концепцию дополнительных измерений, но участвовала в мозговых штурмах на тему бран в МТИ вместе с Раманом Сандрумом из Бостонского университета. Разработанный ими математический аппарат описывал пару вселенных, четырехмерные браны, слабо разделенные пятимерным пространством. Ученые обнаружили, что пространство между бранами деформировано, причем деформация может увеличивать и уменьшать тела или силы между бранами. Следовательно, гравитация может быть такой же сильной, как и другие силы одной браны, но если мы находимся в другой бране, то ощущаем гравитацию как чрезвычайно слабую (илл. 63). Затем Рэндалл и Сандрума ошеломила догадка: пятое измерение может быть бесконечным, и мы об этом не догадаемся. До этого момента физики принимали устоявшуюся точку зрения теории струн: считалось, что дополнительные измерения скручены так туго, что никакой эксперимент не позволит провести испытания. В теории Рэндалл и Сандрума они могут наблюдаться в экспериментах на ускорителях частиц[380].



Илл. 63. Возможное объяснение слабости гравитации связано с бранами, или мембранами — объектами малой размерности, заключенными в многомерное пространство. Гравитация может быть сильной в одной бране, но слабой в другой, причем обе браны являются трехмерными пространствами внутри пятимерного. Пока неясно, могут ли более высокие измерения или соседние браны обнаруживаться в лаборатории или ускорителе частиц. *Крис Импи*

Этот труд сделал их суперзвездами. Сандрум получил семь предложений работы. Результат превзошел все ожидания, особенно если вспомнить, какую тревогу вызывали у него эти идеи: «Это была умопомрачительная работа. У нас были причины для ужасных волнений. Всякий раз был отчетливый страх выставить себя полными дураками». Рэндалл стала первым «пожизненным» профессором теоретической физики в долгой истории Гарвардского университета, начала писать книги для массового читателя[381]. Несколько больше хлопот доставляют регулярные приглашения выступить на тему женщин в науке. «Мне нравится решать простые проблемы, например, дополнительные измерения пространства, – невесело шутит она. – Все считают простой тему “женщины в науке”, но она намного сложнее»[382].

Браны имеют непосредственное отношение к черным дырам. Как мы увидели в главе 1, Стромингер и Вафа с помощью теории струн воспроизвели энтропию и излучение черных дыр,

выведенные Стивеном Хокингом из классической физики. Обернув браны вокруг тесно скрученных областей пространственно-временного континуума, теоретики доказали, что могут вычислить массу и электрический заряд внутренней зоны черной дыры. Тот факт, что чистая математика, разработанная совершенно с другой целью, может использоваться для расчетов свойств «реальных объектов» – таких как черные дыры, был расценен как триумф теории струн.

Возможно, мы живем в трехмерном пузыре, плавающем в море мембран с пятью, шестью, семью или более измерениями[383]. Все это многообразие сведено в одно целое, которое называется мультивселенной. Она отличается от мультивселенной, описанной в конце последней главы и основанной на других пространственно-временных континуумах, которые могут следовать из квантовых вакуумных состояний, сосуществующих с Большим взрывом. Мультивселенная теории струн – это комплекс неведомых многомерных пространств, сосуществующих со Вселенной, в которой мы живем.

Более высокие измерения пока не были зарегистрированы ни в лабораторных экспериментах, ни на ускорителях частиц, и многие физики считают браны, как и струны, лишь хитроумными математическими построениями, мало связанными с реальностью. В некоторых кругах здоровый скептицизм превратился в резкое отторжение. Однако Рэндалл не теряет надежды. Гуру гравитации продолжает свою работу в неизведанных областях высшей математики. Пусть последнее слово останется не за физиком, а за лириком Э. Э. Каммингсом: «Слушайте, здесь по соседству есть чертовски хорошая вселенная, пойдемте!»[384]

Квазар у нас под боком

Черные дыры – это эволюционные тупики. Для массивной звезды это итог существования: больше никакая энергия не вырабатывается – и гравитация побеждает. Сверхмассивные черные дыры в центрах галактик являются глубочайшими гравитационными колодцами в космосе. Они неуклонно растут и не могут голодать вечно. Мы заняли лучшие места в театре, где наблюдаем за эволюцией ближайшей массивной черной дыры – она находится в нашей собственной Галактике. Можно ли заглянуть в тот момент прошлого, когда Млечный Путь впервые засиял, и предсказать, когда он снова ярко засияет в будущем?

Лучший показатель активности – рентгеновское излучение, поскольку оно проходит сквозь газ и пыль диска Галактики, тогда

как оптическое излучение поглощается и рассеивается. В течение 20 лет наблюдений через рентгеновские телескопы объект Стрелец A* по большей части вел себя очень спокойно. Каждые несколько месяцев происходят вспышки, менее чем на час делающие его в 5–10 раз ярче[385].

Однако это лишь 20 лет наблюдений. Изменения питания черной дыры заметны только в масштабах времени, превышающих человеческую жизнь. Объединенные данные четырех спутников зарегистрировали рентгеновское «эхо» большой вспышки, произошедшей 300 лет назад. В тот момент Стрелец A* стал в миллион раз ярче, затем излучение отразилось от молекулярного облака, находящегося в нескольких сотнях световых лет от черной дыры, и пришло на Землю. Первоначальное излучение по большей части достигло Земли в начале XVIII в., когда не существовало рентгеновских телескопов для наблюдения за ним. Само событие произошло 27 000 лет назад, когда наши древние предки достигли северной Азии, впервые покинув Африку[386]. В столь ярком событии, по всей видимости, участвовала черная дыра, поглотившая звезду.

Что можно сказать о еще больших масштабах времени? Можем ли мы узнать, что делала дремлющая ныне черная дыра в центре нашей Галактики миллионы лет назад? Да, и это решает проблему, связанную с балансом вещества Млечного Пути. Наша Галактика весит в триллион раз больше Солнца. Около 85 % этой массы составляет темная материя – невидимая и таинственная субстанция, удерживающая все галактики вместе. На долю нормальной материи остается около 150 млрд солнечных масс. Когда астрономы сложили массу всех звезд, газа и пыли, то насчитали лишь половину этого количества. Потерянную материю они обнаружили с помощью рентгеновского телескопа – в форме горячего плотного тумана, пронизывающего Галактику. Они увидели «пузырь» малой плотности, выдающийся из центра Галактики на две трети расстояния до Земли. Они вычислили энергию, необходимую для опорожнения такого большого пузыря, и сделали вывод, что галактика Млечный Путь должна была в прошлом пройти фазу квазара[387]. Ударная волна движется со скоростью 3,2 млн км/ч и достигнет нас примерно через 3 млн лет, так что для паники нет причин. Если отмотать назад 20 000 световых лет, мы поймем, что фаза квазара началась 6 млн назад, когда по Земле бродили ранние гоминиды. Хронология подтверждается наличием звезд возрастом 6 млн лет возле центра Галактики, вероятно, образовавшихся из вещества, падающего в черную дыру в течение еще более ранней фазы питания. Черная дыра Млечного Пути активно питалась 6 млн лет

назад, затем извергла так много энергии и газа, что осталась без пищи и впала в спячку.

Что уготовило центру Галактики будущее? Сейчас он очень спокоен, но это не навсегда. Можно ожидать, что квазар у нас под боком зажигается каждые несколько сотен миллионов лет. Есть признаки того, что центр Галактики готовится к очередной активной фазе. Рентгеновские наблюдения принесли свидетельства наличия сонма из 20 000 черных дыр и нейтронных звезд в пределах трех световых лет от Стрельца A*[388]. Это самая высокая концентрация остатков коллапсировавших звезд во всей Галактике. Они перемещаются к центру в течение нескольких миллиардов лет. Если вы наполните горшок одинаковыми шариками из черного мрамора и из дерева и встряхнете его, то мраморные шарики переместятся на дно, потому что они тяжелее. Аналогичным образом гравитационные взаимодействия заставляют черные дыры стягиваться ближе к центру, в отличие от более многочисленных нормальных звезд.

Однако шансы того, что мы станем свидетелями возвращения активности квазара, чрезвычайно малы. Черная дыра в центре такой галактики, как Млечный Путь, имеет шанс стать ярче в миллиард раз в течение лишь 1 % оставшегося срока жизни Солнца 5 млрд лет[389]. В последний раз Млечный Путь был квазаром, когда шимпанзе и люди разошлись на эволюционном древе. Следующий раз, вероятно, произойдет через десятки миллионов лет в будущем.

Если наш биологический вид еще будет существовать, что он увидит? Воочию – ничего. Между нами и Стрельцом A* так много пыли, что почти весь видимый свет будет блокирован. Радиоджеты, невидимые для человеческого глаза, пересекут небо под прямым углом к Млечному Пути. Будет и высокоэнергетическое излучение, которое вызовет увеличение уровня мутаций. Если мы не спрячемся в стационарных убежищах, наша ДНК станет неуклонно разрушаться. Зато, если мы сумеем подняться на 100 световых лет над диском Галактики, то получим великолепный вид на сияющую черную дыру с ярким, как полная луна, аккреционным диском.

Слияние с Андромедой

Мы движемся встречным курсом с нашей ближайшей соседкой. До того как умрет Солнце, Млечный Путь и галактика Андромеды сблизятся, вступят во взаимодействие и сольются – последствия этого для Солнечной системы и ее обитателей непредсказуемы. Слияние черных дыр в центрах обеих галактик

станет одним из самых зрелищных событий, какое только можно себе представить.

Уже 100 лет мы знаем, что M31, галактика Андромеды, приближается к нам со скоростью 120 км/с. В целом, галактики удаляются от нас вследствие расширения Вселенной, но Млечный Путь и галактика Андромеды находятся достаточно близко, и их обоюдная гравитация преодолевает расширение космоса. Измерения бокового движения галактики Андромеды, полученные космическим телескопом «Хаббл», показывают, что она направляется почти точно навстречу нам[390]. По данным компьютерного моделирования, через 2 млрд лет галактики пройдут мимо друг друга. Пока они будут расходиться, их соединит едва различимый мост из звезд и газа. Сейчас галактика Андромеды – это слабое размытое пятнышко света, едва различимое невооруженным глазом. Через 4 млрд лет она будет грозно нависать в ночном небе над всеми, кто еще будет жить на Земле (илл. 64). Примерно через 4,5 млрд лет от настоящего времени галактики снова сблизятся, совершат несколько тесных оборотов и сольются. Пройдет еще миллиард лет, и они примут окончательную форму большой новой галактики – Млекомеды.

Название гипотетической новой галактике дал Ави Лёб из Гарвардского университета, разработавший вместе с постдоком из Гарварда Т. Дж. Коксом компьютерное моделирование слияния. Они играли с допущениями и начальными условиями, и каждый раз на моделирование уходило две недели работы машины, эквивалентной 20 самым продвинутым персональным компьютерам[391]. Столкновение двух галактик не похоже на лобовой удар двух автомобилей. Галактики представляют собой по большей части пустое пространство, поэтому лишь немногие звезды действительно столкнутся. Если бы звезды были величиной с мяч для гольфа, то в той области, где находится Солнце, их разделяло бы пространство в 1000 км, и даже в центре Галактики межзвездный интервал составил бы 3–4 км. Гравитация сильно сместит звезды, но их планетные системы останутся нетронутыми, поэтому, когда нас столкнет с привычной орбиты в диске Млечного Пути, будущие земляне увидят новое ночное небо.

Илл. 64. Млечный Путь и галактика Андромеды движутся к столкновению. Изображение показывает ночное небо Земли почти через 4 млрд лет, после того как две галактики пройдут мимо друг друга и снова, в последний раз, начнут сближаться. Млечный путь деформирован их взаимодействием. После слияния галактик черные дыры в центре обеих также сольются в новую, более массивную черную дыру. *NASA / Научный институт космического телескопа*

Что произойдет с Землей и Солнечной системой в галактической катастрофе? Имеется 10 %-ная вероятность, что во время первого прохода галактик вблизи друг друга Солнце будет выброшено в приливной хвост. (Приливной хвост образуется, когда гравитация двух протяженных объектов возмущает и деформирует их.) Тогда мы сможем взглянуть на последующие события с высоты птичьего полета. Есть 3 %-ный шанс, что галактика Андромеды «похитит» Солнце у Млечного Пути. Во втором и последнем сближении Солнце с вероятностью 50 % сместится к плотной внутренней области Млекомеды или, что столь же вероятно, будет выброшено вовне, и нашим потомкам доведется издали наблюдать, как гравитация формирует правильную галактику из того, что получилось после столкновения.

Однако все это – лишь разогрев перед выступлением. Гвоздем программы станет контакт черной дыры Млечного Пути в 4 млн солнечных масс и в 50 раз более массивной черной дыры галактики Андромеды[392]. Черные дыры соединятся возле центра Млекомеды, они будут перемещаться внутрь, передавая энергию звездам на пути, причем некоторые из этих звезд будут вообще выброшены из Млекомеды. Это займет около 10 млн лет. Когда

они сблизятся на расстояние одного светового года, то войдут в смертельную спираль и после мощного выплеска гравитационных волн сольются[393].

Слияние Млечного Пути и галактики Андромеды не будет чем-то необычным. Подобные события постоянно происходят во Вселенной. Частота слияний падает по мере расширения Вселенной, но все еще остается существенной. Не все слияния следуют схеме соединения черных дыр, зарегистрированной LIGO. Когда сливаются двойные черные дыры звездной массы с противоположными направлениями осевого вращения, гравитационные волны могут нести импульс такой силы, что соединяющаяся пара получит толчок «отдачи». Силы отдачи может хватить, чтобы выбросить вовне останки этого слияния. Такие галактики, как Млечный Путь, временами выкидывают черные дыры в межгалактическое пространство. После соединения двух галактик это может произойти и со сверхмассивными черными дырами. Какая удивительная картина: гигантские «голые» черные дыры плывут в космосе между галактиками со скоростью миллионы километров в час.

Обнаружено с полдесятка двойных систем сверхмассивных черных дыр. Из предыдущей главы мы узнали, что для регистрации их слияния был создан космический интерферометр LISA. Теоретические инструменты, необходимые для моделирования этих слияний, – недавняя разработка[394]. Нам не придется ждать сигнала миллиарды лет, как в случае Млекомеды. Квазар PG 1302–102 находится от нас в 3,5 млрд световых лет. Он имеет двойную систему черных дыр на орбите с периодом пять лет, из чего следует, что черные дыры разделяет всего один световой месяц. Это значит, что смертельная спираль неизбежна (впрочем, это уже случилось 3,5 млрд лет назад – если учитывать время, в течение которого информация доходит до нас). Еще более многообещающей является пара черных дыр в 10 млрд световых лет отсюда, каждая из которых в несколько миллиардов раз массивнее Солнца[395]. Судя по орбитальному периоду в полтора года, между ними – 6 радиусов Шварцшильда, следовательно, система уже близка к слиянию, которое вызовет гравитационные волны. На самом деле эти черные дыры слились миллиарды лет назад, но нам нужно подождать несколько тысячелетий, чтобы услышать их пространственно-временную песню.

Самые большие черные дыры во Вселенной

Когда слышишь о сверхмассивных черных дырах,

вспоминается Гаргантюа – это темная центральная система фильма «Интерстеллар». Гаргантюа – цель космических путешественников, надеющихся через кротовую нору совершить прыжок сквозь пространственно-временной континуум. Она в 100 млн раз массивнее Солнца, имеет горизонт событий размером с орбиту Земли и вращается со скоростью в 99 % световой. Как мы узнали, Гаргантюа – самое реалистичное изображение черной дыры в массовой культуре благодаря участию Кипа Торна, проследившего за тем, чтобы фильм удовлетворял требованиям науки и искусства[396].

Масса Гаргантюа в 25 раз больше, чем у черной дыры в центре Млечного Пути, но и она – малышка по сравнению с самыми массивными черными дырами. Слоуновский цифровой небесный обзор выявил в дальней вселенной десять черных дыр более 10 млрд солнечных масс[397]. Они должны были очень быстро поглощать вещество, чтобы всего за 1,5 млрд лет увеличиться в миллион раз от своей начальной массы. Рядом с этими чудищами меркнет размер Солнечной системы (илл. 65). Рекордсменом является мощный радиоквазар с черной дырой в 40 млрд солнечных масс[398].

Астрономы обращаются с большими числами довольно бесцеремонно, но давайте остановимся и задумаемся о параметрах экстремальных черных дыр. Черная дыра в 40 млрд раз массивнее Солнца, имеет радиус Шварцшильда в 4 световых дня, следовательно, ее горизонт событий в 20 раз больше Солнечной системы до орбиты Плутона и других карликовых планет. Черная дыра вращается со значительной частью скорости света. Если внешние планеты Солнечной системы проходят орбиту за 250 лет, то этот намного более крупный объект совершает полный оборот за три месяца. В объем Солнечной системы втиснута масса маленькой галактики, но ее средняя плотность в 100 раз меньше, чем у воздуха, которым вы дышите. Черная дыра совершенно не излучает свет, но окружающий ее аккреционный диск ярко светится. Черная дыра такой массы в фазе активного квазара излучает в 100 трлн раз сильнее Солнца.

Что ждет самые массивные черные дыры во Вселенной? Галактики растут, поглощая газ из космического пространства, а также увеличиваются путем слияний. В обоих случаях источники скудеют. По мере увеличения Вселенной запасы газа истощаются, а галактики расходятся все дальше и сливаются реже. Масса всех звезд галактики коррелирует с массой ее центральной черной дыры – в диапазоне от черных дыр в 10^4–10^5 солнечных масс в шаровых скоплениях до черных дыр 10^6–10^7 солнечных масс в галактиках, подобных Млечному Пути, и далее до черных дыр в

10^{10} солнечных масс в эллиптических галактиках, совокупность звезд которых в триллион раз массивнее Солнца. Независимо от размера звездной системы центральная черная дыра составляет около 1 % массы ее звезд и всего 0,1 % массы галактики с учетом темной материи.

Илл. 65. Черная дыра в центре ближней галактики NGC1277 потенциально является самой массивной из когда-либо найденных, ее масса около 17 млрд солнечных, хотя другое исследование показало лишь 5 млрд масс Солнца. На этой диаграмме представлен размер ее горизонта событий в сравнении с Солнечной системой. Черная дыра этой галактики в десять раз больше ее звездной массы в сравнении с большинством галактик. *Д. Беннингфилд / К. Гебхардт / StarDate*

Я много лет пытался постичь жизнь и судьбу сверхмассивных черных дыр. Мы с моим студентом Джонатаном Трампом провели в общей сложности десятки ночей у 6,5-метровых телескопов в Аризоне и Чили. Благодаря современному оборудованию данные, которые когда-то приходилось копить всю жизнь, можно собрать за время, пока аспирант пишет диссертацию. В классической спектроскопии свет одной активной галактики проходит через

щель инструмента и раскладывается в спектр. В инструменте, которым мы пользовались в Чили, маленькие щели наводились на сотни объектов в области неба размером с полную Луну. Одна долгая выдержка – и у вас есть 100 объектов с массой черной дыры. Из этих данных мы надеялись воссоздать связную картину расцвета и упадка активности квазаров во Вселенной. Квазары находятся очень далеко, и неважно, в какую сторону направлен телескоп, но я предпочитаю южное небо. Млечный Путь, протянувшийся над головой, как рваная серебряная занавесь, выглядит великолепно, а дополнительные бонусы – это соседние с нами галактики, Магеллановы Облака, разбросанные, словно ватные шарики, по черному полотнищу. На улице было так темно, что под светом звезд можно было читать книгу.

Мы собрали статистические данные, охватывающие всю линию эволюции черных дыр в масштабах космического времени. Для этого нужно учесть все черные дыры, не только экстремальные. Я избавился от юношеской одержимости блазарами и теперь хотел узнать, от чего зависит все население активных галактик. По аналогии, если вы заинтересуетесь составом автопарка, то насчитаете намного больше фордов и тойот, чем машин марки «Феррари» и «Астон-Мартин». Большой загадкой являлось то, что черные дыры активны лишь малую часть времени. Вторая тайна – тесная взаимосвязь между массой черной дыры в центре галактики и массой всех старых звезд в той же галактике, разбросанных на масштабные расстояния. Кажется, черная дыра «знает», в какой галактике живет.

По нашим данным, самые большие черные дыры быстро росли первые несколько миллиардов лет после Большого взрыва, а затем у них кончилось топливо. Более многочисленные черные дыры меньшей массы росли медленнее, но в последние 5 млрд лет тоже в большинстве своем успокоились. Пик эры квазаров давно миновал, но черные дыры не исчезли, и можно предположить, что они «голодают», поскольку со временем их питание урезается. Это звучит разумно, так как расширяющаяся Вселенная становится менее плотной и частота слияний галактик снижается. Однако невозможно предсказать для каждой эпохи космического времени и конкретной массы галактики, какая черная дыра будет активной, а какая – спокойной. Столь же трудно предсказать будущее квазаров.

Мы превратили исследование в игру, разложив на столе карточки с описаниями квазаров, как филателисты. Некоторые квазары были яркими – не потому ли, что имели галактику-компаньона, которой кормятся? В отдельных случаях, но не всегда. Не потому ли некоторые из них тусклые, что живут в

галактике, бедной газом? Необязательно. Мы не могли найти фактор, который запускал бы ядерную активность. Композиция нашей картины была логичной, но отдельные ее фрагменты были окрашены случайным образом.

Природа изобретательна: она создает черные дыры, массы которых различаются в миллиард раз (илл. 66). В ходе нашей работы мы ни разу не нашли черную дыру, превышающую 10 млрд солнечных масс. Что даже слегка удручает: я всегда мечтал упомянуть о таком открытии в своем резюме. Предсказания теоретиков устанавливают предел массы черной дыры в десять раз больше, около 10^{11} солнечных[399]. На этом уровне становится важна физика процесса аккреции, независимо от массы родительской галактики. По-видимому, это естественный предел для черных дыр. Чтобы стать еще больше, черная дыра должна поглощать 1000 солнечных масс в год, а такое количество газа коллапсировало бы в новые звезды на пространстве в сотни световых лет, не успев достигнуть черной дыры. Кроме того, в черных дырах запускаются процессы саморегуляции. Испускаемое вовне излучение отталкивает поступающий газ и препятствует дальнейшему питанию. Раздувшееся чудовище жаждет пищи, но в доступных пределах ничего нет.

Илл. 66. Массы сверхплотных космических тел — от белых карликов до сверхмассивных черных дыр в ядрах галактик. Три типа тел малой массы образуются в момент умирания звезд, причем чем массивнее звезда, тем массивнее ее остаток. Известно лишь несколько черных дыр промежуточной массы, они найдены в центре шаровых скоплений или карликовых галактик. Самые массивные черные дыры обнаружены в центре самых массивных галактик во Вселенной. *NASA / Лаборатория реактивного движения / Калифорнийский технологический институт*

Эра звездных остатков

Хотя массивные черные дыры в центрах галактик приближаются к естественному пределу, смерть массивных звезд по-прежнему формирует новые черные дыры малой массы. Звездная эволюция – это битва между силами света и тьмы: энергия термоядерного синтеза поддерживает распухание звезды, а гравитация пытается заставить ее сжаться. Как мы видели, в Солнце эти силы будут в равновесии следующие 5 млрд лет, затем гравитация победит и сожмет ядро в белый карлик. Массивные звезды эволюционируют быстрее, и после победы гравитации от них остаются нейтронные звезды или черные дыры.

Вселенная катится во тьму. Первые звезды образовались примерно через 100 млн лет после Большого взрыва, когда Вселенная была в 30 раз меньше и горячее, чем сейчас. Пик строительства галактик и формирования звезд произошел примерно через 3 млрд лет после Большого взрыва, и с тех пор наблюдается спад. Уровень формирования звезд в настоящее время составляет от 30 до 40 % от пикового, и спад продолжится,

поскольку новым звездам доступно все меньше газа. Даже если мы будем ждать вечно, количество новых звезд оставит всего 5 % от числа возникших на данный момент[400]. Это средние показатели: в любую эпоху в более массивных и богатых газом галактиках темпы формирования звезд выше, чем в менее массивных и бедных газом. Уменьшение количества доступного газа будет долгое время компенсироваться звездами, которые в конце жизни выбрасывают часть своей массы или гибнут как сверхновые.

Наряду со снижением темпов звездообразования все большая доля звездной массы всех галактик будет находиться в состоянии коллапсировавших остатков. Когда формирование звезд полностью завершится и возникнет последняя черная дыра примерно через 100 трлн лет от нынешнего времени, – гравитация одержит окончательную победу[401]. Так совпало, что это ожидаемая продолжительность жизни красных карликов наименьшей массы – холодных звезд лишь чуть массивнее порогового значения, что позволяет поддерживать термоядерный синтез: 0,08 солнечных масс. Временной размах впечатляет. Мы пока находимся в самой ранней фазе жизни Вселенной, озаренной звездами, – в масштабах человеческой жизни это возраст младенца недели от роду.

В отдаленном будущем, по окончании звездной эры, 400 млрд звезд Млекомеды поровну разделятся на белые и коричневые карлики, дополненные малочисленным населением нейтронных и черных дыр. Звезды более 0,08 и менее 8 солнечных масс коллапсируют приблизительно до размеров Земли и излучат оставшуюся энергию в космос, став белыми карликами. Несостоявшиеся звезды – от 0,01 до 0,08 солнечных масс (10–80 масс Юпитера) – коллапсируют в коричневые карлики, возможно, синтезирующие гелий из дейтерия в минимальных объемах[402]. Нейтронные звезды составят 0,3 % всех звездных остатков Млекомеды, а черные дыры буду равны ничтожным 0,03 %.

По прошествии необозримого времени белые и коричневые карлики настолько остынут, что их излучение сместится в невидимые инфракрасные частоты. Какое-то время черные дыры в двойных системах будут ярко сиять благодаря газу, оттягиваемому у компаньонов, но постепенно и компаньоны станут звездными остатками, и газовый источник истощится. Галактики постепенно погрузятся во тьму.

Будущее испарение и распад

Описанное нами отдаленное будущее ждет не только Млекомеду, но и каждую из сотен миллиардов галактик наблюдаемой Вселенной. На их звезды действуют те же законы астрофизики, что и на звезды в нашей системе. Однако наши потомки не смогут увидеть, как погаснут все другие галактики. Причина – в темной энергии.

Темная энергия – главная тайна космологии. В 1995 г. астрономы обнаружили, что расширение Вселенной ускоряется из-за неизвестной силы, противодействующей силе гравитации, которая должна была бы замедлять этот процесс. Космический «пирог» состоит на 25 % из темной материи, на 70 % из темной энергии и на 5 % из нормальной материи. На большие и маленькие черные дыры приходится до 0,005 % Вселенной, так что это очень малозначительный компонент[403]. Из-за темной энергии наблюдаемые сейчас галактики постепенно исчезнут из виду, поскольку будут удаляться прочь быстрее скорости света. Через 100 млрд лет, что в десять раз больше нынешнего возраста Вселенной, все галактики, кроме Млекомеды, покинут наш горизонт событий[404]. Нам останется, образно выражаясь, смотреть на собственный пупок. Конец звездной эры и последующие события можно будет наблюдать только в Галактике, в которой мы обитаем.

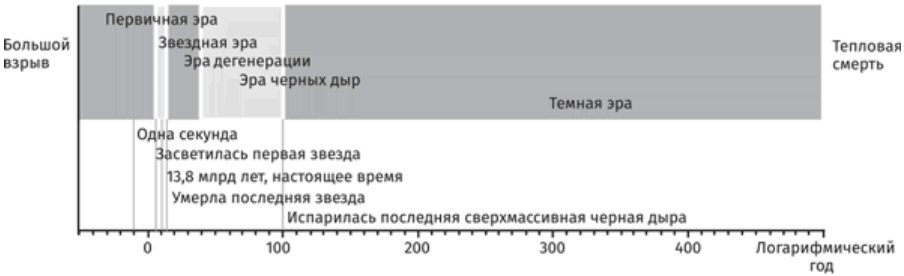
После того как Млекомеда станет темной, ее ждет испарение и распад. Со временем звезды галактики начнут обмениваться энергией: более легкие станут получать энергию, а более тяжелые – терять. Вспомните сравнение с горшком, заполненным мраморными и деревянными шариками одинакового размера: если его встряхнуть, мраморные шарики перемещаются на дно. Некоторые звезды получат достаточно энергии, чтобы покинуть Млекомеду, и галактика станет меньше и плотнее. При этом частота взаимодействий между звездами увеличится и процесс ускорится. В то же время разрушение звездных орбит вследствие излучения гравитационных волн заставит звезды переместиться внутрь галактики. Примерно через 10^{19} лет 90 % звездных остатков будет извергнуто. Млекомеда испарится, последние 10 % остатков упадут в сверхмассивную черную дыру. После слияния Млечного Пути с Андромедой центральная черная дыра будет приблизительно в 200 млн раз массивнее Солнца. Постепенно она дорастет до 10 млрд солнечных масс[405]. Если бы теперешний возраст Вселенной составлял первую неделю вашей жизни, вам нужно было бы прожить еще 10 млн лет, чтобы увидеть, как все это случится.

Еще более отдаленное будущее туманно, остаются только догадки. Физики выходят за рамки Стандартной модели физики

частиц, чтобы объяснить, почему во Вселенной намного больше материи, чем антиматерии, и попытаться объединить электромагнитную силу со слабым и сильным ядерными взаимодействиями. Эти модели называются теориями Великого объединения (Grand Unified Theories, GUT), и многие предсказывают распад протона. Если протоны распадаются, нормальная материя теряет стабильность. Эта форма распада никогда не наблюдалась, и на сегодня время жизни протона при наличии распада оценивается в 10^{34} лет, что исключает некоторые, но не все, теории Великого объединения[406]. Если распад протона существует, то все остатки звезд, кроме черных дыр, развалятся на электроны, нейтрино и фотоны[407].

Окончательное исчезновение Вселенной займет невероятно много времени. Если предположить, что нормальная материя распадется, то останутся только черные дыры – звездной массы и сверхмассивные. Стивен Хокинг предсказал, что черные дыры испускают небольшое количество низкоэнергетического излучения, из-за чего медленно испаряются. Важно понимать, что это умозрительная конструкция, поскольку излучение Хокинга никогда не наблюдалось и не имеется технологии наблюдения. Процесс испарения остатков массивной звезды занимает 10^{76} лет. Сверхмассивная черная дыра в центре Млекомеды испарится за 10^{100} лет. Никакие сравнения с повседневностью и близко не могут передать этой бездны времени, почти вечности. Однако и это лишь промежуточная станция на пути к окончательной тепловой смерти Вселенной (илл. 67).

«Все рушится, ничто не устоит, над миром всем анархия царит», – писал Уильям Батлер Йейтс в 1919 г.[408] Он говорил о Первой мировой войне, но то же можно отнести и к предчувствию конца Вселенной. Научный контекст такого исхода – второй закон термодинамики, описывающий универсальную тенденцию к увеличению энтропии и хаоса. Артур Эддингтон подтвердил общую теорию относительности, но не поверил в предсказание существования черных дыр. Однако он однозначно высказался о неизбежности тепловой смерти Вселенной: «Закон, согласно которому *энтропия* всегда возрастает, занимает, я полагаю, главенствующее положение среди *законов Природы*. Если кто-то скажет, что ваша излюбленная теория находится в противоречии с *уравнениями Максвелла* – что ж, тем хуже для уравнений Максвелла. Если обнаружится, что она противоречит наблюдениям – что ж, экспериментаторы иногда халтурят. Но если окажется, что ваша теория нарушает *второй закон термодинамики*, надеяться вам не на что; ей не остается ничего другого, кроме как провалиться в ничтожество и забвение»[409].



Илл. 67. Далекое будущее Вселенной. На этом логарифмическом графике — вся история Вселенной, вплоть до настоящего времени, находится с краю слева. Даже исчезновение большинства массивных черных дыр путем испарения — не последний физический процесс. После еще одного огромного промежутка времени нормальная материя распадается, и Вселенная превращается в высокоэнтропийный бульон из частиц и низкоэнергетических протонов. *Крис Импи*

Черные дыры – загадка, и то, что именно они станут последними объектами во время конца Вселенной, – вполне закономерно.

Жизнь среди черных дыр

Наше повествование стало темным и мрачным, но не будем забывать, что Вселенная создана для жизни. Хотя астрономы еще не нашли следов биологической жизни за пределами Земли, они полны оптимизма. Потенциально обитаемые места Солнечной системы есть на Марсе, Европе и Титане, а также на десятках лун планет-гигантов, где под панцирем из камня и льда течет вода[410]. В 1995 г., после десятилетий безуспешных поисков, была открыта первая экзопланета, то есть планета, обращающаяся вокруг другой звезды. С тех пор словно открылись шлюзы, и нынешний список подтвержденных экзопланет включает больше 3700 позиций[411]. Первые экзопланеты были найдены методом Доплера, суть которого состоит в выявлении притяжения, действующего со стороны планеты на родительскую звезду; впоследствии почти все открытия совершались транзитным методом – во время затмения экзопланета на мгновение делает родительскую звезду более тусклой[412].

В Млечном Пути находится громадное количество – 10 млрд – землеподобных планет с условиями на поверхности, пригодными для наличия жидкой воды[413]. Многие из 100 млрд звезд Млечного Пути имеют землеподобные планеты. Если для

жизни нужны только углеродный материал, жидкая вода и местный источник энергии, то найдется еще несколько сотен миллионов пригодных для обитания мест на менее гостеприимных спутниках и планетах. Время – другой постоянный актив, столь же ценный, что и пространство. Во Вселенной было достаточно углерода для формирования «клона» Земли в пределах миллиарда лет после Большого взрыва, поэтому некоторые землеподобные планеты имели перед Землей эволюционную фору в 8 млрд лет. Мы просто слишком несведущи и не можем вообразить все формы биологической жизни, которые могли развиться в этих бесчисленных мирах.

Поскольку мы не знаем о существовании жизни даже в одном ином мире, возможно, задумываться о перспективах жизни в далеком будущем – это самонадеянно, но мы все-таки попробуем.

Жизни не нужна звезда. Все, что ей нужно, – источник энергии. Согласно второму закону термодинамики, биологические формы нуждаются в разнице температур, создающей пригодный для использования источник энергии. Земля поглощает фотоны Солнца с температурой 6000 кельвинов и излучает в небо в 20 раз больше фотонов с температурой 300 кельвинов. В биологических организмах протекают сложные процессы, локально снижающие энтропию – или хаос, но эти организмы излучают тепло или тратят энергию, которая со временем излучается в космос. Энергетический аргумент применим даже к искусственной (искусственный интеллект), небиологической жизни, поскольку любая обработка информации требует энергии в той или иной форме.

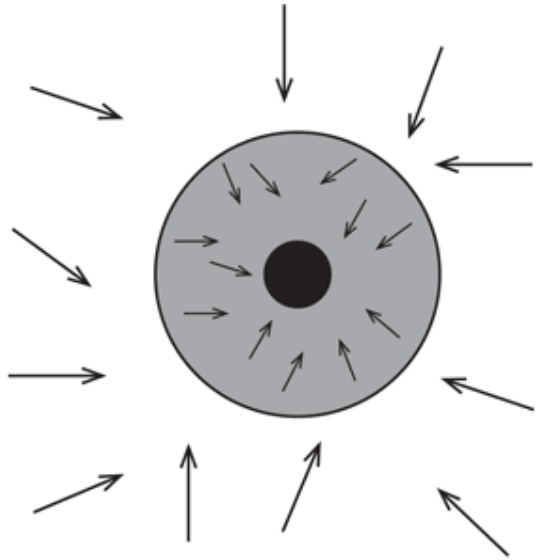
Когда звезды Вселенной исчерпают ядерное топливо, гипотетическая цивилизация далекого будущего все еще сможет использовать разницу температур между последними остывающими угольками – белыми и коричневыми карликами – и глубоким космосом. Физик Фримен Дайсон размышлял о будущем жизни и пришел к такому выводу: биологические организмы могут выжить в эру снижения энергопотока, впадая в спячку на все более долгие промежутки времени[414]. Так можно протянуть около 10 млрд лет, но что будет, когда все звезды окончательно погаснут?

Спасением станут черные дыры. Теоретически энергию можно извлекать из вращения черной дыры. Сразу за горизонтом событий имеется область, которая называется эргосферой. Это слово происходит от греческого «работа» и было предложено, что и неудивительно, Джоном Уилером. Эргосфера увлекается вращающейся черной дырой, как вода водоворотом, и на полюсах черной дыры она тоньше – представьте себе вращающийся

воздушный шарик, наполненный водой: из-за вращения образуется выпуклость на экваторе. Роджер Пенроуз в 1969 г. предположил, что из эргосферы можно получать энергию[415]. При правильной траектории тело сумеет проникнуть в эргосферу и покинуть ее с большей энергией, чем на входе. В результате вращение черной дыры только слегка замедлится. Цивилизация, проведя тщательные расчеты, сможет бросать объекты в черную дыру и получать дополнительную энергию, которую объекты обретут, будучи выброшенными обратно.

Другая здравая идея – поменять температуры местами и получить холодную звезду и горячее небо. Черные дыры в сегодняшней Вселенной часто бывают яркими, потому что вещество, падая в них, образует горячий аккреционный диск. Однако в далеком будущем газ уже будет поглощен, и черные дыры станут холодными и темными, за исключением слабенькой «мороси» излучения Хокинга с температурой в долю градуса. По сравнению с этим Вселенная является «комфортно теплой» – ее температура 2,7 кельвина обеспечивается остаточным излучением Большого взрыва, но будет снижаться по мере дальнейшего расширения Вселенной. Теоретики рассчитали, что землеподобная планета на орбите черной дыры – достаточно близкой, чтобы та казалась такого же размера, что и Солнце на нашем небе, – могла бы выиграть около киловатта на разнице температур[416]. Возможно, этого хватит для миниатюрной или очень эффективной цивилизации (илл. 68).

Аналогичная стратегия была использована в фильме «Интерстеллар», в котором мир под названием планета Миллер находился вблизи массивной вращающейся черной дыры Гаргантюа. Гравитация настолько замедляет время, что один час на планете равен семи годам во внешнем мире. В теории обитатели планеты Миллер могли бы добывать 130 ГВт энергии, но то, что люди способны там жить, – смелое кинематографическое допущение. Такая огромная энергия разогреет планету до 900 °C – достаточно, чтобы расплавить металл.



Илл. 68. Метод получения малой энергии из черной дыры цивилизацией далекого будущего. В классической сфере Дайсона оболочка, построенная вокруг звезды, улавливает энергию звезды и излучает вовне избыточное тепло. В этой версии излучение Хокинга, исходящее от черной дыры, будет холоднее, чем микроволновое излучение Большого взрыва, поэтому оболочка поглощает внешнее микроволновое излучение и сбрасывает отработанное тепло в черную дыру, позволяя использовать немного энергии. *T. Opatrny, L. Richterek, and P. Bakala, Am.J. Phys., vol. 85 / Американский институт физики*

Проблемой использования черных дыр для получения энергии излучения Большого взрыва является скорость расширения космического пространства. Температура этого излучения сейчас составляет 2,7 кельвина, но, поскольку темная энергия вызывает экспоненциальный рост Вселенной, фотоны излучения растягиваются вследствие ее расширения, длина их волны становится очень большой, а их энергия очень малой. Через 100 млрд лет температура излучения Большого взрыва будет равна крохотной доле градуса.

Цивилизациям придется менять стратегии. Излучение Хокинга у черной дыры минимальной массы, составляющей три солнечные, имеет температуру 2 ? 10^{-8} кельвинов и светимость 10^{-29} Вт. Оно совсем слабое, но, кроме энергии вращения черной дыры, оно будет единственным источником энергии до тех пор, пока черные дыры не испарятся – через 10^{76} лет. Чтобы собрать все это излучение, цивилизация должна будет окружить черную дыру разновидностью сферы, которую, по мнению Фримена

Дайсона, могут использовать разумные инопланетяне[417]. Затем внимание будет обращено на сверхмассивную черную дыру в центре Млекомеды. При температуре 6?10^{-18} кельвинов и светимости 10^{-48} Вт она станет угасающим костром, у которого можно будет погреть руки. Жизнь в далеком будущем потребует экономии и терпения, но, пока не испарится последняя черная дыра – что случится через 10^{100} лет, – единственным недефицитным ресурсом во Вселенной будет время.

В своих исследованиях я лишь бросил беглый взгляд на черные дыры. Они огромны и непостижимы, видны через безбрежные пространства, разделяющие нас с далекими галактиками. Моя жизнь коротка в сравнении с их жизнью. Сколько они просуществуют? Моргните. Вы могли бы сделать это миллиард миллиардов раз с момента Большого взрыва. Время, за которое большинство массивных черных дыр исчезнет, относится к возрасту Вселенной так, как возраст Вселенной относится к продолжительности моргания глаза. И так еще три раза, пока не пройдет 10^{100} лет.

Это непостижимая бездна времени. Английское слово *clock* («часы») – старинное слово. Оно происходит от слова из среднеанглийского языка[418], обозначающего колокольчик, и напоминает о временах, когда у часов не было ни стрелок, ни цифр, ведь совсем немногие были грамотными. Далеко в будущем, после эпохи существования человечества, после маятниковых часов, а затем эры механических часов с ее Timex и Rolex, после распада последних радиоактивных атомов и после того, как остановится последний пульсар, настанет время черных дыр.

Я представляю себе, что бессмертен. Если бы я смог дожить до конца времени черных дыр, наблюдая за тем, что делаем мы или цивилизации с других звезд, что бы я увидел?

Сначала была бы эпоха варваров – продолжение той, в которой живем мы, когда цивилизации воюют друг с другом, и худшая судьба для побежденного врага – быть брошенным в черную дыру и мучительно погибнуть, будучи разорванным на части гравитацией. Затем, возможно, наступает эпоха цивилизации, когда живые существа оставляют образы, застывшие на горизонте событий больших черных дыр, в качестве вечных памятников. Я оптимист и воображаю эпоху знания, когда одни учатся считывать информацию, сохраняющуюся в голографической форме на горизонте событий, а другие отваживаются проникать во вращающиеся черные дыры, чтобы обрести убежище на времяподобной поверхности, в зале зеркал времени, где можно путешествовать назад и вперед, встречаясь со

своими прошлыми и будущими «я», но откуда невозможно выйти. Наконец, наступает эпоха чувствования, когда жизнь сводится к чистой обработке информации, а черные дыры являются разновидностью информационного хранилища. Приятно думать, что их тайнописью, возможно, поддерживается ритм жизни вселенной, возможно, поддерживают ритм жизни Вселенной.

Гравитация – слабейшая из сил, но наиболее почитаемая и самая упорная. Другие силы давным-давно перестали действовать. Все субатомные частицы распались, электромагнитное излучение рассеялось и растянулось, превратившись в ничто. Оглушительные раскаты гравитационного излучения, испускаемого при слиянии черных дыр, навсегда отгремели. Последняя музыка сфер – басовое бренчание вращения черных дыр. Они медленно и неуклонно испаряются. Это конец. Вселенная распадается в почти идеальную однородность, и только квантовые флуктуации слегка тревожат вакуум.

Благодарности

Я признателен моей жене Дине за поддержку во всех моих творческих начинаниях. Я благодарен моему литературному агенту Анне Гош, которая направляет мою писательскую деятельность в максимально продуктивное русло. Я также признателен Тому Майеру, моему редактору в Norton, и хочу выразить отдельную благодарность Саре Боллинг за ее примечания к первому варианту текста. Я благодарен Центру физики в Аспене – его спокойная атмосфера, так стимулирующая работу мысли, как нельзя лучше подходит для работы над научной книгой. Я должен отметить неоценимую пользу многочисленных дискуссий на тему черных дыр с моими коллегами со всего мира, и в частности из Аризонского университета. Их приверженность делу только доказывает, что Вселенная – это удивительное место. Быть ученым, наставником, делиться вдохновением с другими людьми – великая удача для меня.

notes

Сноски

1

Пер. Ю. Корнеева.

2

Это также отсылка к сборнику коротких рассказов британского писателя Мартина Эмиса об угрозе ядерной войны. Имеется в виду уравнение Эйнштейна $E = mc^2$, описывающее колоссальную мощь, заключенную в ядре атома. См.: Martin Amis, *Einstein's Monsters* (London: Jonathan Cape, 1987).

3

R. MacCormmach, *Weighing the World: The Reverend John Michell of Thornhill* (Berlin: Springer, 2012).

J. Michell, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London* 74 (1784): 35–57.

S. Schaffer, “John Michell and Black Holes,” *Journal for the History of Astronomy* 10 (1979): 42–43.

6

Опыт Майкельсона и Морли представлял собой попытку обнаружить эфир – пронизывающую космос диффузную среду, гипотеза существования которой была предложена для объяснения распространения силы гравитации и электромагнитных волн. Этот знаменитый «неудачный» физический эксперимент показал, что свет приходит с одинаковой скоростью, независимо от движения Земли, перемещающейся вокруг Солнца со скоростью 30 км/с. Нулевой результат эксперимента сыграл основополагающую роль в формулировании специальной теории относительности. Новые данные исключают наличие переносящей свет среды с точностью до 1 из 10^{17}.

Лаплас П. С. Изложение системы мира. – Л.: Наука, 1982.

C. Montgomery, W. Orchiston, and I. Whittington, “Michell, Laplace, and the Origin of the Black Hole Concept,” *Journal of Astronomical History and Heritage* 12 (2009): 90–96.

9

В студенческие годы, изучая физику в Лондоне, я ездил в Кембридж, пытаясь постичь личность Исаака Ньютона. Я хотел понять, что за человек стоит за уравнениями. Коллега провел меня в комнаты Ньютона в Тринити-колледже. В его кабинете с узкими арочными окнами и панелями из темного дерева было сумрачно даже в полдень. Я читал, что он решал проблемы, «непрестанно размышляя о них», и мой сопровождающий рассказал об одном из редких случаев, когда Ньютон принимал гостей. Он пошел в кладовую за бутылкой портвейна, заметил на столе неоконченные расчеты и занялся ими. Забытые гости тихонько удалились.

Во дворе я прошел по засыпанным гравием дорожкам, где 300 лет назад Ньютон чертил схемы тростью. Члены колледжа привыкли перешагивать через них, если заставали гения за работой. Во второй половине дня я поехал в дом в Вулсторп Мэнор, где прошло детство Ньютона. Его часто отправляли в соседнюю деревню с поручениями или просили отвести подковать коня. Через несколько часов мать находила его на мосту, где он стоял, уставившись на воду, уйдя в свои мысли: поручения забыты, конь куда-то убрел. Я был рад увидеть за домом яблоневый сад.

10

Из предисловия к кн.: Richard S. Westfall, *Never at Rest: A Biography of Isaac Newton* (Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1983).

Ньютон И. Математические начала натуральной философии. – М.: Наука, 1989.

J. Stachel et al., *Einstein's Miraculous Year: Five Papers That Changed the Face of Physics* (Princeton: Princeton University Press, 1998).

13

Мысленный эксперимент – мощный инструмент развития науки, восходящий к древнегреческой философии, способ задать гипотетический вопрос Природе. Галилей осуществил один из первых мысленных экспериментов в физике, размышляя о том, с какой скоростью падали бы разные тела, сброшенные с башни (вопреки расхожему мнению, он никогда не ставил его на практике). Эйнштейн с помощью мысленных экспериментов прорабатывал вопросы относительности, и ученые-физики начала XX в. часто использовали этот метод, пытаясь понять следствия квантовой теории материи.

14

Теория носит математический характер и устрашающе сложна, но имеется ряд научно-популярных введений в нее. К лучшим относятся R. Geroch, *General Relativity from A to B* (Chicago: University of Chicago Press, 1978); D. Mermin, *It's About Time: Understanding Einstein's Relativity* (Princeton: University of Princeton Press, 2005 и конечно, классическая работа Альберта Эйнштейна: *Relativity: The Special and General Theory* (New York: Crown, 1960). Биография Эйнштейна: A. Pais, *Subtle is the Lord: The Science and Life of Albert Einstein* (Oxford: Oxford University Press, 1982).

15

Пер. Владимира Кормана. – *Прим. пер.*

The Sonnets of Robert Frost, edited by J.M. Heley (Manhattan, KS: Kansas State University, 1970).

D.E. Lebach et al., “Measurement of the Solar Gravitational Deflection of Radio Waves Using Very-Long-Baseline Interferometry,” *Physical Review Letters* 75 (1995): 1439–42.

C.W. Chou, D.B. Hume, T. Rosenband, and D.J. Wineland, “Optical Clocks and Relativity,” *Science* 329 (2010): 1630–33.

N. Ashby, “Relativity and the Global Positioning System,” *Physics Today*, May 2002, 41–47.

20

Цит. по: S. Chandrasekhar, “The General Theory of Relativity: Why Is It Probably the Most Beautiful of All Existing Theories,” *Journal of Astrophysics and Astronomy* 5 (1984): 3–11.

21

В аспирантуре я пытался усвоить общую теорию относительности, и опыт убедил меня, что мое будущее связано с наблюдениями, а не с теорией. Много лет спустя я провел некоторое время «в тени Эйнштейна» во время творческого отпуска в Принстоне. Он жил там почти 20 лет, с 1936 г. до смерти, работая не в Принстонском университете, а в находящемся рядом Институте перспективных исследований. Однажды я заглянул в его бывший кабинет, извинившись перед нынешним владельцем – выдающимся канадским математиком Робертом Ленглендсом. По дороге от съемного дома, где я жил, к институту я проходил мимо белого дощатого дома Эйнштейна на улице Мерсер. Впоследствии в его доме жили физик Фрэнк Вильчек, затем экономист Эрик Маскин, оба также нобелевские лауреаты. Я гадал, можно ли стать умнее, живя в доме с такой историей.

После смерти Эйнштейна его останки исчезли. Врач, проводивший вскрытие, извлек мозг и сохранил его части в сосуде в своем кабинете в Уэстоне (Миссури). Офтальмолог забрал глаза и спрятал в банковском сейфе. В Принстоне я слышал, что прах Эйнштейна был развеян над рекой Делавэр к югу от города. Во время пробежек по берегу реки я размышлял, какие извилистые пути в пространстве и времени подхватили его атомы после Большого взрыва, пропустили их через ядра звезд, на краткое время собрали их воедино ради уникального постижения относительности и растворили в море.

The Collected Papers of Albert Einstein, volume 8A, *The Berlin Years: Correspondence*, edited by R. Schulmann, A.J. Kox, M. Janssen, and J. Illy (Princeton: Princeton University Press, 1999).

23

A. Pais, *J. Robert Oppenheimer: A Life* (Oxford: Oxford University Press, 2006).

Оппенгеймер Ю., Снайдер Г. О безграничном гравитационном сжатии. Альберт Эйнштейн и теория гравитации: Сб. статей. – М.: Мир, 1979.

25

J.R. Oppenheimer and H. Snyder, “On Continued Gravitational Contraction,” *Physical Review* 56 (1939): 455–59.

R. Rhodes, *The Making of the Atomic Bomb* (New York: Simon & Schuster, 1986).

J.A. Hijaya, “The Gita of Robert Oppenheimer,” *Proceedings of the American Philosophical Society* 144, no. 2 (2000), https://amphilsoc.org/publications/proceedings/v/144/n/2.

C.W. Misner, K.S. Thorne, and J.A. Wheeler, *Gravitation* (New York: W.H. Freeman, 1973).

29

A. Finkbeiner, “Johnny and Oppie,”2013, http://www.lastwordonnothing.com/2013/08/21/6348/.

30

Сложному отношению Оппенгеймера к своей работе над бомбой и его опале посвящено несколько прекрасных книг. См.: K. Bird and M.J. Sherwin, *American Prometheus: The Triumph and Tragedy of J. Robert Oppenheimer* (New York: Alfred A. Knopf, 2005), и M. Wolverton, *A Life in Twilight: The Final Years of J. Robert Oppenheimer* (New York: St. Martin's Press, 2008). Описание проекта атомной бомбы изнутри: H. Bethe, *The Road from Los Alamos* (New York: Springer, 1968). Многие физики испытывали недобрые чувства в адрес Эдварда Теллера, более воинственного, чем Уилер, и демонстративно отказавшегося поддержать Оппенгеймера, когда того лишали допуска к секретной работе.

31

Цитируется с чужих слов в автобиографии Уилера: J.A. Wheeler, *Geons, Black Holes, and Quantum Foam: A Life in Physics* (New York: Norton, 1998).

32

В действительности история более запутана. Исследование Марсии Бартусяк показало, что термин «черная дыра» впервые прозвучал на собрании ученых в конце 1963 г. и был использован в публикации в начале 1964 г. Бесспорно, однако, что он стал популярным благодаря Уилеру. См.: https://www.sciencenews.org/blog/context/50-years-later-it's-hard-say-who-named-black-holes.

Хокинг С. Краткая история времени. – СПб.: Амфора, 2010.

34

S. Hawking, *A Brief History of Time* (New York: Bantam, 1988). Хокинг вспоминал, что издатель его предупредил: каждое уравнение, приведенное в книге, уменьшит число читателей вдвое. Так что он выбросил из рукописи всю математику, ограничившись единственным уравнением $E = mc^2$. Тем не менее книга читается довольно туго, поэтому Хокинг написал сокращенную и упрощенную версию: S. Hawking, *The Illustrated Brief History of Time* (New York: Bantam, 1996). В предисловии Карла Сагана к первому изданию рассказывается о случайной встрече в Лондоне в 1974 г., когда Хокинга принимали в Королевское общество. Глядя, как молодой человек в инвалидном кресле медленно вписывает свое имя в книгу, на первых страницах которой значится имя Ньютона, он понял, что Хокинг – уже легенда.

35

Поп-культура часто сводила образ Стивена Хокинга к архетипу – блестящий интеллект, запертый в разрушающемся теле, поэтому трудно понять, что это был за человек. Добавление к этой плоской картинке третьего измерения вскрывает некоторые неприятные истины. Его первая жена Джейн Уайльд пожертвовала научной карьерой, чтобы заботиться о Стивене и растить их троих детей практически в одиночку. Впоследствии он бросил ее ради одной из своих сиделок (с ней также последовали брак и развод). Воспоминания Уайльд рисуют образ человека, способного на эгоизм и женоненавистничество, но ее точку зрения затмили его собственные воспоминания, а также медийная картинка, уподобленная героическому нарративу. Проблемные стороны личности Хокинга не умаляют его удивительного жизнелюбия перед лицом пожизненного изнуряющего заболевания. См.: Jane Hawking, *Music to Move the Stars: A Life with Stephen Hawking* (Philadelphia: Trans-Atlantic, 1999); ее вторая, менее резкая версия воспоминаний: *Travelling to Infinity: My Life with Stephen* (London: Alma, 2007).

K. Ferguson, *Stephen Hawking: His Life and Work* (New York: St. Martin's Press, 2011). Более старой, но лучше раскрывающей его вклад в физику, является биография: M. White and J. Gribbin, *Stephen Hawking: A Life in Science* (Washington, DC: National Academies Press, 2002).

37

Евклидова геометрия – это знакомая всем формальная система, применимая к линейному пространству ньютоновской гравитации. Чтобы справиться с общей теорией относительности, Эйнштейну пришлось обратиться к инструментарию топологии – области математики, которая описывает пространство (произвольной размерности), деформированное растяжением, смятием или сгибанием. Его гениальность проявилась в том числе в умении осознать, что в физическую теорию гравитации можно включить математику.

S. Hawking and R. Penrose, “The Singularities of Gravitational Collapse and Cosmology,” *Proceedings of the Royal Society* A 324 (1970): 539–48.

39

Электрический заряд – третье возможное свойство черной дыры. Однако, поскольку черные дыры образуются при коллапсе материи, являющейся электрически нейтральной, заряженная черная дыра считается искусственным построением, маловероятным в реальности. Электрическая сила на 40 порядков сильнее гравитации, и даже самый слабый электрический заряд препятствовал бы формированию черной дыры. Рой Керр обобщил решение уравнений черной дыры для случая ее вращения почти через 50 лет после первого решения Шварцшильда в работе: R.P. Kerr, “Gravitational Field of a Spinning Mass as an Example of Algebraically Special Metrics,” *Physical Review Letters* 11 (1963): 237–38. Общая теория относительности позволяет такую сложную геометрию пространственно-временного континуума, что уравнения лишь в редких случаях имеют полное решение, только приближенное, с широкими допущениями относительно симметрии.

J.D. Bekenstein, “Black Holes and Entropy,” *Physical Review* D7 (1973): 2333–46.

41

S. Hawking and R. Penrose, *The Nature of Space and Time* (Princeton: Princeton University Press, 2010), 26. Хокинг написал много узкоспециальных статей об излучении и испарении черных дыр; наиболее доступной является статья: S. Hawking, “Black Hole Explosions?” *Nature* 248 (1974): 31–32.

A. Einstein and N. Rosen, “The Particle Problem in the General Theory of Relativity,” *Physical Review Letters* 48 (1935): 73–77.

43

Буквальный перевод слова wormhole – «червоточина». – *Прим. пер.*

S. Weinberg, *The First Three Minutes* (New York: Basic Books, 1988), 131.

M. Amis, *Night Train* (New York: Vintage, 1999), 114.

A.Z. Capri, *From Quanta to Quarks: More Anecdotal History of Physics* (Hackensack, NJ: World Scientific, 2007).

47

В обиходном значении энтропия означает беспорядок, но изначальное определение из физики связано с количеством эквивалентных микроскопических конфигураций системы. Поскольку имеется огромное число способов сделать черную дыру – по сравнению с относительно ограниченным количеством возможностей сделать звезду, энтропия черной дыры очень высока. С математической точки зрения черная дыра солнечной массы имеет энтропию в 100 млн раз выше, чем Солнце.

D. Overbye, “About Those Fearsome Black Holes? Never Mind,” *New York Times*, July 22, 2004, http://www.nytimes.com/learning/students/pop/20040723snapfriday.html.

49

Это отсылка к Эйнштейну, называвшему подгонку своего решения для общего принципа относительности под принятую у астрономов начала 1900-х гг. картину статичной Вселенной своей «грубейшей ошибкой». Для объяснения гравитации Эйнштейн ввел так называемую космологическую константу. По иронии, теперь известно, что Вселенная ускоряется и что это поведение хорошо описывается космологической константой.

50

Нам хорошо знакомы приливные силы, действующие в Солнечной системе. Ближняя сторона Земли испытывает более сильное притяжение Луны, чем дальняя, и, когда океаны реагируют на эту разницу, возникают приливы. Солнце также оказывает на Землю приливное воздействие, но более слабое из-за большего расстояния. Если приливная сила, действующая на твердое тело, например естественный спутник и астероид, превышает его прочность, то тело разрушается. Граница области, внутри которой меньшее тело разрывается приливными силами большего тела, называется пределом Роша. Приливные силы, действующие на маленький спутник Юпитера Ио, вызывают на нем самую мощную вулканическую активность в Солнечной системе. В математическом выражении приливное ускорение в теле размером d на расстоянии R от тела массой M равно $2GMd/R^3$.

51

У научных пари интересная история. Одно из первых известных пари было связано с гравитацией. В 1648 г. английский архитектор Кристофер Рен предложил книгу стоимостью два фунта стерлингов (эквивалентно сегодняшним $400) любому, кто сумеет вывести законы движения планет Кеплера из закона обратной квадратичной зависимости для гравитации. Этот вызов был намеренной попыткой заставить Исаака Ньютона завершить расчеты и опубликовать результат, что он впоследствии и сделал в своем главном труде о гравитации *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*, нарушив, однако, сроки пари.

A. Strominger and C. Vafa, “Microscopic Origin of the Bekenstein – Hawking Entropy,” *Physical Letters* B379 (1996): 99–104.

53

Объединение квантовой теории с общей теорией относительности заняло последние 20 лет жизни Эйнштейна. Он так и не добился успеха. Некоторые самые очевидные идеи квантовой гравитации – например, что гравитация переносится частицей – гравитоном, быстро упирались в технические проблемы. Роль времени также очень сильно различается в квантовой механике и общей теории относительности. Теория струн считается многообещающим подходом, но создает огромное число состояний вакуума, в которых трудно разобраться. По иронии, недавний прогресс в описании черных дыр с точки зрения теории струн отчасти связан с отключением гравитации! По всей видимости, пройдет немало лет, прежде чем это направление исследований созреет или выдаст предсказания, которые можно будет проверить.

54

A. Strominger and S. Hawking, “Soft Hair on Black Holes,” *Physical Review Letters* 116 (2016): 231301–11. Более читабельное интервью с Энди Строминджером о его работе можно найти в блоге Сета Флетчера *Dark Star Diaries*: http://blogs.scientificamerican.com/dark-star-diaries/stephenhawking-s-new-black-hole-paper-translated-an-interview-with-co-authorandrew-strominger/.

Твен М. Старые времена на Миссисипи // Собрание сочинений: в 8 т. Т. 4. – М., 1980.

56

Баланс гравитации и давления в звезде, получающей энергию термоядерного синтеза, называется гидростатическим равновесием. Это процесс с отрицательной обратной связью, как у термостата. Если по какой-то причине Солнце испытает внешнее давление и будет сжато, температура уплотнившегося газа увеличится, скорость реакции ядерного синтеза возрастет и будет создано большее давление, которое несколько расширит Солнце. Если по какой-то причине Солнце несколько расширится, внутренняя температура упадет, ядерный синтез замедлится и Солнце, создавая меньшее внутреннее давление, немного сожмется. Звезды, подобные Солнцу, долгое время сохраняют устойчивость и не имеют ничего общего с бомбами.

На самом деле проблемы у земной биосферы начнутся существенно раньше. – *Прим. науч. ред.*

58

Про звезду, синтезирующую гелий из водорода, говорят, что она находится на главной последовательности. В начале XX в. астрономы Эйнар Герцшпрунг и Генри Норрис Рассел продемонстрировали, что, если представить светимость звезд в зависимости от их цвета или температуры поверхности, они не займут все части диаграммы. Большинство звезд укладывается в диагональ от высоких яркости и температуры до низких яркости и температуры. Звезды, использующие другие виды ядерного топлива или коллапсировавшие в свои конечные состояния, лежат в других частях диаграммы.

59

Закон излучения, при помощи которого можно описывать звездный свет, называется законом Стефана – Больцмана. Он описывает абсолютно черное тело, но с некоторыми оговорками его можно применять и к звездам. Закон Стефана – Больцмана гласит, что вся энергия, излученная звездой, пропорциональна произведению площади поверхности и температуры в четвертой степени. Следовательно, излучение быстро уменьшается с уменьшением размера звезды и еще быстрее – с падением ее температуры.

E. Opik, “The Densities of Visual Binary Stars,” *Astrophysical Journal* 44 (1916): 292– 302.

61

A.S. Eddington, *Stars and Atoms* (Oxford: Clarendon Press, 1927), 50.

62

Цит. по кн.: J. Waller, *Einstein's Luck* (Oxford: Oxford University Press, 2002).

Физическое состояние белого карлика называется вырожденным веществом. Давление вырожденного газа зависит только от плотности, но не от температуры. Вырожденное вещество сжимаемо, поэтому радиус белого карлика большой массы меньше, а его плотность выше, чем у белого карлика малой массы. Высокое содержание углерода и квазикристаллическая атомная структура белых карликов нашли отражение в песне рок-группы Pink Floyd из альбома Wish You Were Here «Shine On, You Crazy Diamond» являющейся аллюзией на эти небесные тела (а также посвящением основателю группы Сиду Барретту).

S. Chandrasekhar, “The Maximum Mass of Ideal White Dwarfs,” *Astrophysical Journal* 74 (1931): 81–82.

J.R. Oppenheimer and G.M. Volkoff, “On Massive Neutron Cores,” *Physical Review* 55 (1939): 374–81.

P. Haensel, A.Y. Potekhin, and D.G. Yakovlev, *Neutron Stars* (Berlin: Springer, 2007).

Ответом Роберта Форварда на этот вызов стала книга «Яйцо дракона» (Dragon's Egg, New York: Del Rey, 1980), ныне классика научной фантастики. Он изобразил крохотные разумные существа, живущие на поверхности нейтронной звезды, которые развиваются и мыслят в миллион раз быстрее людей.

10^{15}. – *Прим. пер.*

См.: J. Emspak, “Are the Nobel Prizes Missing Female Scientists?” *Live-Science*, October 5, 2016, http://www.livescience.com/56390-nobel-prizesmissing-female-scientists.html. В других областях, в которых вручается Нобелевская премия, женщины лишь немного более удачливы. В астрономии соотношение полов постепенно улучшилось, но мужчин с высшими учеными званиями попрежнему больше, чем женщин, и мужчинам вручается львиная доля главных наград. Я довольно хорошо знаком с Джоселин Белл, мы какое-то время пересекались в Королевской обсерватории в Эдинбурге, и вместе с моей матерью она долгие годы посещала один тот же квакерский молитвенный дом. Джоселин Белл живо описывает момент открытия, когда увидела на ленте самописца регулярные всплески, не имеющие очевидного объяснения. Она, словно детектив, рассматривала и отвергала другие объяснения, одно за другим. Что касается Нобелевской премии, Джоселин без малейшей горечи говорит об этом упущении в начале жизненного пути, поскольку во всех остальных отношениях сделала блистательную карьеру. См. ее собственный рассказ: J.S. Bell Burnell, “Little Green Men, White Dwarfs, or Pulsars?” *Annals of the New York Academy of Science* 302 (1977): 685–89.

Талеб Н. Черный лебедь. М., 2015. В этом случае «черным лебедем» являются черные дыры, которые были предсказаны, но считались редкостью, которую, по мнению некоторых, невозможно обнаружить.

S. Bowyer, E.T. Byram, T.A. Chubb, and H. Friedman, “Cosmic X-Ray Sources,” *Science* 147 (1964): 394–98.

72

Две статьи, в которых Лебедь X-1 был назван первым достоверным кандидатом в черные дыры: B.L. Webster and P. Murdin, “Cygnus X-1: A Spectroscopic Binary with a Massive Companion?” *Nature* 235 (1971): 37–38; C.T. Bolton, “Identification of Cygnus X-1 with HDE226868,” *Nature* 235 (1971): 271–73. Статья с указанием точного положения источника рентгеновских лучей: L. L.E. Braes and G.K. Miley, “Detection of Radio Emission from Cygnus X-1,” *Nature* 232 (1971): 246.

73

Из: Bruce Rolston, “The First Black Hole,” news release, University of Toronto, November 10, 1997, https://web.archive.org/web/20080307181205/, http://www.news.utoronto.ca/bin/bulletin/nov10_97/art4.htm.

Рекомендующий присутствие родителей. – *Прим. пер.*

75

Канадская группа Rush, работающая в жанре прогрессив-рок, услышала о первой черной дыре вскоре после ее открытия и написала цикл песен «Cygnus X-1», вошедший в два ее альбома, 1977 и 1978 гг. В этом аллегорическом сочинении исследователь проникает в черную дыру с криком: «Звук и ярость переполняют меня, разрывается каждый нерв». Во второй части цикла он находится за горизонтом событий в мире под названием Олимп, где встречает воюющие племена Аполлона, управляемые логикой, и племена Диониса, управляемые эмоциями. Апофеоз астрономии и рок-музыки случился на два года раньше, в 1975 г., когда Pink Floyd выпустили концептуальный альбом Wish You Were Here с композицией из девяти частей «Shine On You Crazy Diamond». Песня является двойной метафорой: с одной стороны, данью памяти человеку, который ярко горел, но рано ушел, с другой – аллюзией на белые карлики, состоящие из квазикристаллического углерода. «Твои глаза смотрят как черные дыры на небе», – пел Роджер Уотерс.

Аналогией является ситуация с детскими качелями или качалкой-балансиром. Когда на концы качалки садятся два человека одного веса, они находятся в равновесии. Если сядут ребенок и взрослый, то взрослый должен сместиться ближе к середине, чтобы уравновесить ребенка. Это рычаг с центром равновесия работает так же, как орбита с центром масс. Когда массы резко различаются, как у планеты и звезды, вокруг которой она вращается, орбита звезды настолько мала, что она едва покачивается. Например, Юпитер, самая массивная планета Солнечной системы, заставляет Солнце покачиваться с периодом, равным 12-летнему орбитальному периоду Юпитера.

Обычно орбиты являются эллиптическими, а не круговыми, но это усложнение не влияет на основу рассуждений. Скорость движения по орбите меняется по мере ее прохождения, но средняя скорость является такой же, что и при круговой орбите той же длины.

Полное решение для двойной орбиты дает уравнение $PK^3/2?G = M\ sin^3i/(1 + q)^2$, где P – период, K – половина полной амплитуды изменения лучевой скорости, M – масса черной дыры, а q – соотношение массы компаньона и массы черной дыры.

D. Sobel, *The Glass Universe: How the Ladies of the Harvard Observatory Took the Measure of the Stars* (New York: Viking, 2016).

C. Brocksopp, A.E. Tarasov, V.M. Lyuty, and P. Roche, “An Improved Orbital Ephemeris for Cygnus X-1,” *Astronomy and Astrophysics* 343 (1998): 861–64.

J. Ziolkowski, “Evolutionary Constraints on the Masses of the Components of the HDE226868/Cygnus X-1 Binary System,” *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 358 (2005): 851–59.

J.A. Orosz et al., “The Mass of the Black Hole in Cygnus X-1,” *Astrophysical Journal* 724 (2011): 84–95.

83

Это краткое обсуждение повлекло за собой десятки статей и тысячи часов наблюдений, возвысивших Лебедь X-1 до звания эталонного кандидата в черные дыры. Потребовались годы, чтобы устранить погрешности наблюдения и отвергнуть другие модели. Например, чтобы обойтись без черной дыры, первые модели вводили систему тройных звезд из голубого сверхгиганта и тесной двойной системы, включающей звезду главной последовательности и нейтронную звезду. Постепенно выяснилось, что эти модели крайне маловероятны. См.: H.L. Shipman, “The Implausible History of Triple Star Models for Cygnus X-1: Evidence for a Black Hole,” *Astrophysical Letters* 16 (1975): 9–12.

J. Ziolkowski, “Black Hole Candidates,” in *Vulcano Workshop 2002, Frontier Objects in Astrophysics and Particle Physics*, edited by F. Giovanelli and G. Mannocchi (Bologna: Italian Physical Society, 2003), 49–56, и J.E. McLintock and R.A. Remillard, “Black Hole Binaries,” in *Compact Stellar X-Ray Sources*, edited by W. H.G. Lewin and M. van der Klis (Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2006), 157–214.

Другой способ регистрации изолированных черных дыр основывается на их способности притягивать разреженный газ из межзвездной среды. Если этот газ нагревается, падая в черную дыру, он излучает спектр определенного вида в видимом диапазоне. Одно исследование перебрало почти 4 млн звездных источников из Слоуновского цифрового небесного обзора и выделило 40 из них подходящего цвета со слабым рентгеновским излучением. Ни один из претендентов не подтвердил статус черной дыры, и вердикт этому методу поиска черных дыр пока не вынесен.

86

Темная материя – одна из величайших нерешенных проблем космологии. Движение звезд в галактиках всех типов свидетельствует о том, что они должны удерживаться вместе какой-то формой материи, не излучающей свет, но добавляющей до шести совокупных масс всех звезд. Исследования методом микролинзирования показали, что, по крайней мере в Млечном Пути, темная материя не может состоять из звездных остатков или субзвездных объектов. Инфракрасные наблюдения дополнительно исключили любые каменистые тела – от планет до пылинок. Лучшее оставшееся объяснение – неизвестная массивная, слабо взаимодействующая субатомная частица.

L. Wyrzykowski, Z. Kostrzewa-Rutkowska, and K. Rybicki, “Microlensing by Single Black Holes in the Galaxy,” *Proceedings of the XXXVII Polish Astronomical Society*, 2016. Несмотря на сложность, микролинзирование – важное дополнение к статистическим данным о черных дырах двойных систем. Не найдены черные дыры в двойных системах менее 6 солнечных масс, а почти все нейтронные звезды имеют массы от одной до двух солнечных. Похоже, имеется «разрыв» в распределении масс звездных остатков от 2 до 6 солнечных масс, что, возможно, поставит под сомнение принятые ныне теории их формирования. К счастью, микролинзирование не подтверждает наличие разрыва.

E.A. Poe, “A Descent into the Maelstrom” (1841), in *The Collected Works of Edgar Allan Poe*, edited by T.O. Mabbott (Cambridge, MA: Harvard University Press, 1978).

Цит. по: По Э. А. Стихотворения. Проза. – М.: Художественная литература, 1976.

90

Знаменитая американская дамба Гувера, введенная в действие в 1936 г., вырабатывает в 25 раз меньше электроэнергии и не входит в крупнейшие 50 электростанций мира по объемам производства энергии. Максимальную пиковую выработку дает спорная (по имеющимся и потенциальным негативным последствиям. – *Прим. пер.*) гидроэлектростанция «Три ущелья» в Китае, но по среднегодовой выработке ее слегка опережает «Итайпу».

91

Момент импульса частицы – *mvr*: произведение массы частицы, ее скорости и расстояния до центра вращения. Сохранение момента импульса при орбитальном движении демонстрируется вторым законом Кеплера. Планета или комета, подходя ближе к Солнцу, движется быстрее, следовательно, уменьшение *r* компенсируется увеличением *v*, и произведение остается постоянным.

Настоящие вычисления требуют привлечения общей теории относительности и некоторых приближений. Единственным более эффективным процессом выработки энергии является аннигиляция вещества и антивещества, при котором масса-энергия выделяется с эффективностью 100 %. Однако это очень редкая ситуация во Вселенной, тогда как энергия аккреции выделяется всеми черными дырами в двойных системах. Полное описание см. в учебниках, например: J. Frank, A. King, and D. Raine, *Accretion Power in Astrophysics*, 3rd edition, (Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2002).

93

Вычисление характера потери момента импульса, которое позволяет веществу упасть в черную дыру, было большой проблемой. Ответ включает турбулентность и магнитные поля, пронизывающие аккреционный диск. Первая «стандартная» модель аккреционного диска, частично решившая проблему: N.I. Shakura and R.A. Sunyaev, “Black Holes in Binary Systems: Observational Appearance,” *Astronomy and Astrophysics* 24 (1973): 337–55. Прорыв связан с осознанием того, что магнитные поля могут в огромной мере усиливать перенос момента импульса; см.: S.A. Balbus and J.F. Hawley, “A Powerful Local Shear Instability in Weakly Magnetized Disks: I. Linear Analysis,” *Astrophysical Journal* 376 (1991): 214–33. Чтобы полностью смоделировать ситуацию, понадобились вычислительные возможности современных компьютеров. Трехмерные магнитогидродинамические расчеты относятся к числу самых сложных в астрофизике.

D. Raghavan et al., “A Survey of Stellar Families: Multiplicity of Solar-Type Stars,” *Astrophysical Journal Supplement* 190 (2010): 1–42.

Воображаемая поверхность, ограничивающая область вокруг одного из компонентов двойной системы, в которой вещество гравитационно привязано к этому компоненту, называется полостью Роша – в честь французского астронома и математика середины XIX в. В разделенной двойной системе каждая звезда имеет собственную полость Роша. В полуразделенной двойной системе «капли» соприкасаются, и масса может перетекать через точку соприкосновения, которая называется точкой Лагранжа – в честь итальянского астронома и математика середины XVIII в. В контактной двойной системе звезды имеют общую оболочку, и значительная часть массы является общей. Перенос массы между более удаленными друг от друга звездами возможен, если одна звезда массивна и является источником ветра: часть газа, разлетающегося во все стороны, будет падать на компаньона.

D. Prialnik, “Novae,” *in Encyclopedia of Astronomy and Astrophysics*, edited by P. Murdin (London: Institute of Physics, 2001), 1846–56. Около десяти новых звезд появляется в Млечном Пути ежегодно. По большей части они зажигаются в масштабах времени от 1000 до 100 000 лет. Небольшое число эффектных новых вспыхивает в течение человеческой жизни, они достаточно яркие, чтобы быть видимыми без телескопа. T Северной Короны, или «Вспыхивающая звезда», становилась одной из самых ярких звезд на небе в 1866 г. и в 1949 г., а RS Змееносца разгоралась настолько, что была видна невооруженным глазом пять раз за минувшее столетие, в последний раз в 2006 г.

Этот сценарий может показаться малозначительной заумью, но является основным в современной астрономии. Некоторые сверхновые (типа II) возникают, когда умирает единичная массивная звезда, но их светимость очень сильно различается. Однако если сверхновая взрывается в двойной системе (так называемый тип Ia), то вещество поступает к белому карлику «порционно», упорядоченным образом, и светимость систем отличается всего на 15 %. Такие сверхновые, будучи «стандартными бомбами», являются соответственно и «стандартными свечами», по которым можно измерять расстояние. Поскольку сверхновые могут быть яркими, как целая галактика, они видны за миллиарды световых лет. Сверхновые типа Ia помогли открыть ускорение расширения Вселенной и темную энергию в середине 1990-х гг.; эта работа была удостоена Нобелевской премии. См.: S. Perlmutter, “Supernovae, Dark Energy, and the Accelerating Universe,” *Physics Today*, April 2003, 53–60.

K.A. Postnov and L.R. Yungelson, “The Evolution of Compact Binary Systems,” *Living Reviews in Relativity* 9 (2006): 6–107.

Телескоп обошелся ему в $2000 – около $33 000 на сегодняшние деньги. Ребер все делал сам: клал цемент, работал с металлом и деревом, собирал электрическую часть и приемник, вел наблюдения, очищал данные и давал им астрономическую интерпретацию.

100

Вследствие вращения Земли вокруг Солнца каждая звезда встает и садится на четыре минуты раньше с каждым днем. За год накапливается 24 часа, и все ночное небо описывает над нами круг. Поэтому звездное небо немного отличается от солнечного. Янский использовал это, чтобы показать, что его радиосигнал имеет внеземное происхождение, как и несколько десятилетий спустя Джоселин Белл в отношении пульсаров.

101

K. Jansky, “Electrical Disturbances Apparently of Extraterrestrial Origin,” *Proceedings Institute of Radio Engineers* 21 (1933): 1837. Можно провести удивительную параллель со случайным открытием, сделанным через три десятилетия после обнаружения микроволнового реликтового излучения, оставшегося от Большого взрыва. В 1964 г. Арно Пензиас и Роберт Вильсон в Лабораториях Белла решали вопрос о применимости спутниковой связи на микроволнах. Отслеживая источники радиопомех своего радиоприемника, они обнаружили слабое остаточное «шипение» одинаковой силы во всех частях неба. Это было излучение всей Вселенной, охладившейся и ставшей разреженной вследствие расширения космического пространства. Это открытие не было проигнорировано Лабораториями Белла. В 1978 г. Пензиас и Вильсон получили за него Нобелевскую премию по физике.

102

В честь первопроходца Янского единица плотности потока радиоизлучения была названа «янский», и он оказался в числе немногих пионеров изучения электричества, имена которых были присвоены единицам измерения: Ватт, Вольт, Ом, Герц, Ампер и Кулон. Янский умер в 1950 г. в 44 года от брайтовой болезни, приводящей к отказу почек. Ему не удалось увидеть стремительное развитие научного области, родоначальником которой он стал.

103

Цит. в: W.T. Sullivan, ed., *Classics of Radio Astronomy* (Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1982).

104

Эту историю рассказывает Джон Краус в: *Big Ear* (Delaware, OH: Cygnus-Quasar Books, 1994), и в: J.D. Kraus, “Grote Reber, Founder of Radio Astronomy,” *Journal of the Royal Astronomical Society of Canada* 82 (1988): 107–13.

105

G. Reber, “Cosmic Static,” *Astrophysical Journal* 100 (1944): 279. См. также комментарий, написанный для сотого номера журнала: K.I. Kellerman, “Grote Reber’s Observations of Cosmic Static,” *Astrophysical Journal* 525 (1988): 371–72.

Kraus, “Grote Reber, Founder of Radio Astronomy”.

107

В спектроскопии длина волны спектральных линий соответствует химическим элементам и указывает на химический состав вещества, а физическое состояние газа определяет тип линий. Если более холодный газ находится вокруг более горячего источника энергии, как во внешней оболочке звезды, наблюдаются линии поглощения. Именно их увидел Фраунгофер в спектре Солнца в начале 1800-х гг. Линии излучения возникают, как правило, в разреженном горячем газе. Большая ширина спектральных линий указывает, что газ, в котором они рождаются, движется с большими скоростями. Это признак исключительно мощного источника энергии.

S.J. Dick, *Discovery and Classification in Astronomy: Controversy and Consensus* (Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2013).

109

Мне посчастливилось воспользоваться 2,5-метровым телескопом обсерватории Маунт-Вилсон за год до того, как его законсервировал Институт Карнеги. Все более яркие огни Лос-Анджелеса за несколько лет до этого сделали его неконкурентоспособным, но было восхитительно работать с телескопом, 30 лет являвшимся самым большим в мире – тем самым, с помощью которого Эдвин Хаббл доказал, что галактики находятся очень далеко от Млечного Пути и что Вселенная является огромной и расширяется. Я помню ряд деревянных шкафчиков за северным столбом-опорой, на одном из которых значится имя Хаббла – тщательно выгравированное на медной пластинке. Возможно, Хаббл оставил в нем свой ланч? На полу купола, под ногами, я увидел капли ртути. Подшипники телескопа плавают на ртути, и она протекает; за долгие годы из-за частых контактов с ней умерло несколько сотрудников. Во времена Хаббла наблюдатели работали несколько часов, делали перерыв на ужин, за которым следовал портвейн и сигара, затем возобновляли труды. Ужин в обсерватории Маунт-Вилсон был традиционным и официальным. На вершине горы старший астроном садился во главе стола, остальные штатные астрономы – рядом с ним, студенты и постдоки вроде меня – на дальнем конце. Ужин подавал блистательный, но вспыльчивый французский шеф-повар, открывший несколько ресторанов в окрестностях Лос-Анджелеса, но все они разорились, потому что он ссорился с клиентами и спонсорами. Обсерватория Маунт-Вилсон стала бы идеальным пристанищем для творческого социопата. Еда была великолепная, но такая сытная, что я чуть не засыпал на ходу, а ночь все тянулась. Чтобы взбодриться, я поднялся на лестницу, которая опоясывала купол в три пролета. Над головой мерцали звезды, а внизу сияющей сетью расстилались огни города.

C.K. Seyfert, “Nuclear Emission in Spiral Galaxies,” *Astrophysical Journal* 97 (1943): 28–40.

111

Райл и Ловелл были физиками, прекрасно понимавшими возможности методов радионаблюдений – открывалось новое окно во Вселенную. Они легко преодолели разрыв между инженерной и научной «культурами», и каждый из них организовал в одном из ведущих университетов исследовательскую группу, превратив радиоастрономию в еще одну ветвь астрономии. Специалист по военным радарам Роберт Дикке создал исследовательскую группу в МТИ, но радиоастрономия удивительно медленно приживалась в Соединенных Штатах, на родине Янского и Ребера.

112

Вклад Руби Пэйн-Скотт описан в кн.: M. Goss, *Making Waves: The Story of Ruby Payne-Scott, Australian Pioneer Radio Astronomer* (Berlin: Springer, 2013). Начало истории радиоастрономии превосходно раскрывается в кн.: W.T. Sullivan III, *Cosmic Noise: A History of Early Radio Astronomy* (Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2009).

113

Когда Райл и другие ученые продемонстрировали, что в действительности излучение Лебедя А является неизменным, а наблюдаемая переменность вызвана отклонением радиоволн облаками ионизированного газа в верхних слоях земной атмосферы, это привело ученый мир в еще большее недоумение. Но так и не было покончено с гипотезой «радиозвезды», потому что в оптическом диапазоне звезды мерцают, а планеты нет. Это объясняется тем, что звезды являются точечными источниками, а планеты – дискообразными и мерцание планеты для земного наблюдателя размывается. По той же логике, если Лебедь А мерцает, он должен быть точечным или по крайней мере иметь маленький угловой размер.

B. Lovell, “John Grant Davies (1924–1988),” *Quarterly Journal of the Royal Astronomical Society* 30 (1989): 365–69.

115

Действительная формула имеет вид *? = 1,22 (?/D)*, где *?* – угловое разрешение в радианах, *?* – длина волны наблюдения, *D* – диаметр телескопа (в тех же единицах измерения).

При условии, что находился бы вне земной атмосферы. – *Прим. науч. ред.*

117

Метод является радиоаналогом интерферометра Майкельсона или опыта Янга с двойной щелью. Представьте источник, расположенный точно в зените двух радиотелескопов. Длина пути волн к каждой тарелке одинакова, поэтому, когда эти волны соединяются, они вызывают увеличение амплитуды. По мере движения источника разница между путями изменяется; когда она составляет половину длины волны, два сигнала при наложении нейтрализуются. Таким образом, при движении источника возникает интерференционный рисунок из сильных и слабых сигналов. Ширина интерференционных полос определяется расстоянием между двумя тарелками, поэтому положение источника можно установить с высокой точностью. Группа радиоастрономов из Австралии предложила оригинальную версию этого метода. Антенну поместили на прибрежную скалу и обратили на восток. Когда радиоисточник восходил, то радиоизлучение поступало на антенну как напрямую под малым углом, так и по чуть более длинному пути, отражаясь от поверхности моря. Антенна и ее «зеркальное отражение» являлись двумя элементами интерферометра.

118

Цит. в предисловии редактора к кн.: *Quasi-Stellar Sources and Gravitational Collapse: Proceedings of the First Texas Symposium on Relativistic Astrophysics*, edited by I. Robinson, A. Schild, and E.L. Schucking (Chicago: University of Chicago Press, 1965).

119

Цит. в кн.: J. Pfeiffer, *The Changing Universe* (London: Victor Gollancz, 1956).

A. Alfven and N. Herlofson, “Cosmic Radiation and Radio Stars,” *Physical Review* 78 (1950): 616. Другие ранние статьи: G.R. Burbidge, “On Synchrotron Radiation from Messier 87,” *Astrophysical Journal* 124 (1956): 416–29; V.L. Ginzburg and I.S. Syrovatskii, “Synchrotron Radiation,” *Annual Reviews of Astronomy and Astrophysics* 3 (1965): 297–350.

Чтобы связать сильные радиоисточники с оптическими компонентами, пришлось преодолеть серьезные технические проблемы. Разные радиообзоры не всегда одинаково оценивают силу и даже существование конкретного источника. Угловые размеры радиоисточников разнятся от десятков угловых минут до нескольких угловых секунд, и то, что увидит интерферометр, зависит от количества элементов массива и дистанции между ними, а также от частоты, на которой ведется наблюдение. Кроме того, количество радиоисточников в любой области неба довольно быстро возрастает с уменьшением радиопотока. Это значит, что могут иметься множественные источники вблизи предела регистрации, «притворяющиеся» одним, более сильным. Это так называемый «предел путаницы» (confusion limit) исследования.

C. Hazard, M.B. Mackey, and A.J. Shimmins, “Investigation of the Radio Source 3C273 by the Method of Lunar Occultations,” *Nature* 197 (1963): 1037–39; M. Schmidt, “3C273: A Star-like Object with Large Redshift,” *Nature* 197 (1963): 1040; J.B. Oke, “Absolute Energy Distribution in the Optical Spectrum of 3C273,” *Nature* 1987 (1963): 1040–41; J.L. Greenstein and T.A. Matthews, “Redshift of the Unusual Radio Source: 3C48,” *Nature* 197 (1963): 1041–42. Современный обзор хронологии: C. Hazard, D. Jauncey, W.M. Goss, and D. Herald, “The Sequence of Events that led to the 1963 Publications in Nature of 3C273, the first Quasar and the first Extragalactic Radio Jet,” in *Proceedings of IAU Symposium* 313, edited by F. Massaro et al. (Dordrecht: Kluwer, 2014).

123

Интервью с Мартеном Шмидтом по поводу 50-й годовщины его открытия: http://www.space.com/20244-quasar-mystery-discoverer-interview.html.

124

В действительности и австралийский радиоастроном Джон Болтон, и американский астроном Алан Сэндидж имели в 1960 г. спектр 3C 48 – и оба упустили реальную возможность открыть первый квазар на три года раньше Шмидта.

125

Космологическое красное смещение является иным физическим явлением, чем доплеровское смещение. Доплеровское смещение возникает, когда волна распространяется в среде и источник волны движется относительно наблюдателя. Типичный пример – сирена, звук которой повышается, когда полицейская машина приближается, и понижается, когда машина удаляется. Космологическое красное смещение не требует среды, поскольку изменение длины волны вызывается расширением пространственно-временного континуума повсеместно во Вселенной.

126

Космология распространяет принцип Коперника, согласно которому мы не занимаем особого положения в Солнечной системе, на всю Вселенную. Это фундаментальное допущение современной космологии, до сих пор не опровергнутое ни одним наблюдением. Галактики возле Млечного Пути не выглядят сколько-нибудь отличающимися или иначе распределенными в сравнении с галактиками в дальних областях Вселенной (за исключением эволюционных эффектов).

127

Закон Хаббла: $v = H0D$, где v – скорость удаления, D – расстояние, а коэффициентом пропорциональности является постоянная Хаббла, или нынешняя скорость расширения Вселенной. Приблизительное значение малого красного смещения, выраженное в скорости удаления и скорости света, – $z = v/c$. Точная релятивистская формула: $z = v(1 + v/c) / (1 – v/c)$.

M. Schmidt, “Large Redshifts of Five Quasi-Stellar Sources,” *Astrophysical Journal* 141 (1965): 1295–1300.

129

F. Zwicky and M.A. Zwicky, *Catalogue of Selected Compact Galaxies and of PostEruptive Galaxies* (Guemligen, Switzerland: Zwicky, 1971). Статья, ставшая причиной спора: A. Sandage, “The Existence of a Major New Constituent of the Universe: The Quasi-Stellar Galaxies,” *Astrophysical Journal* 141 (1965): 1560–68. Случай описан в статье: K.I. Kellerman, “The Discovery of Quasars and its Aftermath” *Journal of Astronomical History and Heritage* 17 (2014): 267–82.

130

Следующий этап строительства гигантских телескопов отличался такой же яростной конкуренцией, что и текущий. Каждый из планируемых к постройке 20-метровых и больших телескопов оценивается минимум в миллиард долларов. Гигантский Магелланов Телескоп оказался в выгодном положении, поскольку пять из семи зеркал уже имелись в Аризонском университете, а выравнивание вершины горы и строительство началось в Чили. Проект Калтеха по созданию 30-метрового телескопа остановился из-за протестов гавайских активистов-аборигенов на Мауна Кеа, но теперь к нему вернулись. В Чили отправится и 39-метровый телескоп Европейской Южной обсерватории, и этот проект хорошо финансируется благодаря международному соглашению большинства европейских партнеров. Темной лошадкой в гонке является Китай, который может перепрыгнуть через класс 8–10 м и построить гигантский телескоп на Тибетском плато.

Конструкция из множества тонких шестиугольных сегментов на подложке позволила значительно уменьшить массу стекла по сравнению с цельнолитым. – *Прим. пер.*

Вычисления Сейферта были представлены в: L. Woltjer, “Emission Nuclei in Galaxies,” *Astrophysical Journal* 130 (1959): 38–44. Расчет энергии радиогалактик был представлен в: G. Burbidge, “Estimates of the Total Energy and Magnetic Field in the Non-Thermal Radio Sources,” *Astrophysical Journal* 129 (1959): 849–52.

133

Амбарцумян Виктор Амазаспович (1908–1996), академик АН СССС, основатель школы теоретической астрофизики СССР. – *Прим. пер.*

V. Ambartsumian, “On the Evolution of Galaxies,” in *The Structure and Evolution of the Universe*, edited by R. Stoops (Brussels: Coudenberg, 1958), 241–74.

135

E. Salpeter, “Accretion of Interstellar Matter by Massive Objects,” *Astrophysical Journal* 140 (1964): 796–800; Ya.B. Zeldovich, “On the Power Source for Quasars,” *Soviet Physics Doklady* 9 (1964): 195–205.

Главными сторонниками идеи некосмологического красного смещения в 1960-х и на протяжении 1970-х гг. были Хэлтон Арп и Билл Тиффт со стороны наблюдений и Фред Хойл и Джефф Бербидж со стороны теории. Противостояние «на поле» красного смещения квазаров вызывало бурные и непримиримые дебаты на конференциях. В значительной мере полемика улеглась к 1980-м гг. с принятием космологической интерпретации, но даже сейчас некоторые исследователи утверждают, что квазары не находятся на тех расстояниях, о которых говорят их красные смещения. С аргументами наблюдателей можно познакомиться в: H.C. Arp, “Quasar Redshifts,” *Science* 152 (1966): 1583, теоретиков – G. Burbidge and F. Hoyle, “The Problem of the Quasi-Stellar Objects,” *Scientific American* 215 (1966): 40–52.

137

Все радиоизлучение объясняется синхротронным излучением с эмиссией электронов в горячей, но разреженной плазме. Перенос энергии должен быть очень эффективным, чтобы выйти так далеко за пределы Галактики. Пузыри являются местами, где релятивистские частицы «врезаются» в разреженную межгалактическую среду, часто создавая горячие точки усиленного излучения. Горячая плазма пронизана магнитными полями, что означает, что радиоизлучение имеет линейную поляризацию.

D.S. De Young, *The Physics of Extragalactic Radio Sources* (Chicago: University of Chicago Press, 2002).

139

Статьи об открытии: A.R. Whitney et al., “Quasars Revisited: Rapid Time Variations Observed Via Very Long Baseline Interferometry,” *Science* 173 (1971): 225–30; M.H. Cohen et al., “The Small Scale Structure of Radio Galaxies and Quasi-Stellar Sources at 3.8 Centimeters,” *Astrophysical Journal* 170 (1971): 207–17. Видимое движение со сверхсветовой скоростью было предсказано на основе теоретических рассуждений пятью годами раньше в статье: M.J. Rees, “Appearance of Relativistically Expanding Radio Sources,” *Nature* 211 (1966): 468–70.

A.-K. Baczko et al., “A Highly Magnetized Twin-Jet Base Pinpoints a Supermassive Black Hole,” *Astronomy and Astrophysics* 593 (2016): A47–58.

Области ионизованного водорода вокруг молодых горячих звезд также являются источником сильных эмиссионных линий, но линии в спектрах галактик Сейферта требуют большего количества ультрафиолетового излучения, чем могут дать молодые звезды. Галактики Сейферта с очень широкими эмиссионными линиями, указывающими на движение газа со скоростью до 5 % световой, относят к типу 1, а галактики с более узкими эмиссионными линиями относят к типу 2. Сейфертовские галактики типа 1 обычно ярче галактик типа 2. Имеется даже промежуточный тип «Сейферт 1,5», где эмиссионные линии имеют слабые широкие крылья, наложенные на яркие узкие пики. Астрономы также обнаружили разновидность галактик со слабовозбужденными линиями излучения в ядрах – LINER. Они более активны, чем нормальные галактики, но менее активны, чем сейфертовские. Как видите, классификация активных галактик сложна и запутана.

Такие наблюдения «родительских галактик» квазаров в 1990-х гг. помогли покончить с представлениями о красных смещениях квазаров как некосмологических. Наблюдался непрерывный спектр активных ядер от относительно спокойных ближних до очень далеких и ярких, и данные согласовывались с предположением об их нахождении в галактиках, удаленных на расстояния, на которые указывает красное смещение в расширяющейся Вселенной. Тем временем некоторые свидетельства в пользу некосмологического красного смещения исчезли. Отсутствовало преобладание красных смещений определенных значений, распределение было гладким, а кажущиеся ассоциации квазаров с большим красным смещением и галактик с малым красным смещением оказались совпадениями, не указывающими на физическую связь между ними.

R.D. Blandford and M.J. Rees, “Some Comments on the Radiation Mechanism in Lacertids,” in *Pittsburgh Conference on BL Lac Objects*, edited by A.M. Wolfe (Pittsburgh: University of Pittsburgh, 1978).

C.S. Bowyer et al., “Detection of X-Ray Emission from 3C273 and NGC5128,” *Astrophysical Journal* 161 (1970): L1–L7.

145

Первое высокочувствительное исследование рентгеновского излучения квазаров: H. Tananbaum et al., “X-Ray Studies of Quasars with the Einstein Observatory,” *Astrophysical Journal* 234 (1979): L9–13. Грег Шилдс первым предположил, что источником УФ-излучения квазаров является аккреционный диск: G.A. Shields, “Thermal Emission from Accretion Disks in Quasars,” *Nature* 272 (1978): 706–08. Мэтт Малкан первым построил подробные модели аккреционного диска: M.A. Malkan, “The Ultraviolet Excess of Luminous Quasars: II. Evidence for Massive Accretion Disks,” *Astrophysical Journal* 268 (1983): 582–90.

D.B. Sanders et al., “Continuum Energy Distribution of Quasars – Shapes and Origins,” *Astrophysical Journal* 347 (1979): 29–51.

IceCube Collaboration, “Neutrino emission from the Direction of the Blazar TXS0506 + 056 Prior to the IceCube-170922A Alert,” *Science* 361 (2018), 147–51.

148

Я писал диссертацию о блазарах, которыми увлекся, потому что они обеспечивали лучшую видимость центрального водоворота. К каждому сеансу я готовил «актуальный список» из нескольких десятков объектов, и наблюдение за ними через малые телескопы выявило признаки необычной активности. Иногда объект оказывался пустышкой, пятнышком света, мелким, как мельничный пруд. В других случаях обнаруживалась центральная черная дыра, объедавшаяся газом и звездами и исторгавшая высокоэнергетическое излучение и электроны, распространяющиеся со скоростью 99,999 % скорости света. Как вымышленного рассказчика из новеллы Эдгара По, меня притягивала пугающая красота глубокого и беспощадного гравитационного колодца.

149

M.A. Orr and I. W.A. Browne, “Relativistic Beaming and Quasar Statistics,” *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 200 (1982): 1067–80. Если релятивистский джет направлен близко к лучу зрения, его поток легко может увеличиться в 1000 раз. Противоположный джет быстро движется прочь от наблюдателя, поэтому происходит его ослабление; в результате наблюдатель видит односторонний джет. Распространяющееся радиоизлучение не является частью релятивистского джета, и потому его поток не затронут этим эффектом.

Развитие этой идеи можно проследить по двум статьям, вышедшим с интервалом более 20 лет: R.J. Antonucci, “Unified Models for Active Galactic Nuclei and Quasars,” *Annual Reviews of Astronomy and Astrophysics* 31 (1993): 473–521; H. Netzer, “Revisiting the Unified Model of Active Galactic Nuclei,” *Annual Reviews of Astronomy and Astrophysics* 53 (2015): 365–408.

Самым знаменитым изображением этого мифа является картина Тинторетто «Происхождение Млечного Пути» (1575), хранящаяся в Национальной галерее в Лондоне. По большей части в западных странах люди живут в крупных городах и их пригородах, и световое загрязнение заслоняет им Млечный Путь. Я опрашиваю миллениалов, посещающих большой курс, который читаю в Аризонском университете: обычно только 10 % из них когда-либо видели Млечный Путь.

Z.M. Malkin, “Analysis of Determinations of the Distance between the Sun and the Galactic Center,” *Astronomy Reports* 57 (2013): 128–33.

W.M. Goss, R.L. Brown, and K.Y. Lo, “The Discovery of Sgr A*,” in “Proceedings of the Galactic Center Workshop – The Central 300 Parsecs of the Milky Way,” *Astronomische Nachrichen*, supplementary issue 1 (2003): 497–504.

M.J. Rees, “Black Holes,” *Observatory* 94 (1974): 168–79.

155

Инфракрасные датчики часто создавались для военных целей – например, для отображения места боевых действий в ночное время и отслеживания целей по тепловому излучению, что замедлило внедрение датчиков в гражданской и исследовательской сферах. Кроме того, инфракрасное изображение должно работать с тепловым фоном, в миллионы раз более мощным, чем оптическое излучение ночного неба. История вопроса: G.H. Rieke, “History of Infrared Telescopes and Astronomy,” *Experimental Astronomy* 125 (2009): 125–41. История разработки датчиков: A. Rogalski, “History of Infrared Detectors,” *Opto-Electronics Review* 20 (2012): 279–308. Оптическая астрономия совершила большой рывок в конце 1970-х гг., когда приборы с зарядовой связью (ПЗС) были перемещены из исследовательских лабораторий в обсерватории.

Скучивание изображений в области плотного расположения звезд или ровное распределение света в изображении галактики возникает, когда изображения существенно превышают размеры самих звезд. Проходя через атмосферу Земли, свет звезд существенно размывается независимо от размера источника света. Звезды в нашей части Млечного Пути отдалены друг от друга и почти никогда не сталкиваются; расстояние между ними в миллионы раз больше их размера. Даже в центральной области Млечного Пути интервалы между звездами в десятки тысяч раз больше их самих, и их слияния почти никогда не происходят.

Немецкая группа: A. Eckart and R Genzel, “Observations of Stellar Proper Motions Near the Galactic Centre,” *Nature* 383 (1996): 415–17; A. Eckart and R. Genzel, “Stellar Proper Motions in the Central 0.1 pc of the Galaxy,” *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 28 (1997): 576–98. Американская группа: A.M. Ghez, B.L. Klein, M. Morris, and E.E. Becklin, “High Proper Motion Stars in the Vicinity of Sagittarius A*: Evidence for a Supermassive Black Hole at the Center of our Galaxy,” *Astrophysical Journal* 509 (1998): 678–86.

Цит. в: http://www.pbs.org/wgbh/nova/space/andrea-ghez.html.

159

Райнхард Генцель объясняет, почему так важно, чтобы в непосредственной близости имелась массивная черная дыра, которая в тысячи раз ближе любой другой активной галактики или квазара: «Центр нашей Галактики – это уникальная лаборатория, где мы можем изучать фундаментальные процессы сильной гравитации, звездной динамики и звездообразования, в высшей степени актуальные для ядер всех остальных галактик, причем с уровнем детализации, который никогда не будет доступен за пределами нашей Галактики». Цит. в: http://www.universetoday.com/22104/beyond-any-reasonable-doubt-a-supermassive-black-hole-lives-in-centre-of-our-galaxy/.

160

Неуверенность Андреа Гез как молодого ученого давно осталась в прошлом. Теперь Андреа – суперзвезда и образец для подражания среди молодых женщин, занимающихся астрономией. Гез не было и 40 лет, когда ее избрали в Национальную академию наук, в 2008 г. она получила стипендию Макартура, считающуюся «призом для гениев». Слава никак на нее не повлияла, и она охотно рассказывает, что получает такое же удовольствие от науки, как в раннем детстве, когда она собирала пазлы: «Научные исследования – чудесная стезя, ведь стоит начать работать над одним вопросом, находишь не только ответ, но и новые загадки. Думаю, это мной и движет, всегда есть вопросы без ответов, новые загадки».

F. Roddier, *Adaptive Optics in Astronomy* (Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2004).

A.M. Ghez et al., “Measuring Distance and Properties of the Milky Way’s Supermassive Black Hole with Stellar Orbits,” *Astrophysical Journal* 689 (2008): 1044–62; and S. Gillesen et al., “Monitoring Stellar Orbits Around the Massive Black Hole in the Galactic Center,” *Astrophysical Journal* 692 (2009): 1075–1109.

S. Gillesen et al., “A Gas Cloud on its Way Towards the Supermassive Black Hole in the Galactic Centre,” *Nature* 481 (2012): 51–54.

S. Doeleman et al., “Event-Horizon Scale Structure in the Supermassive Black Hole Candidate at the Galactic Centre,” *Nature* 455 (2008): 78–80.

A. Boehle et al., “An Improved Distance and Mass Estimate for Sgr A* from Multistar Orbit Analysis,” *Astrophysical Journal*, 830 (2016): 17–40.

M. Schmidt, “The Local Space Density of Quasars and Active Nuclei,” *Physica Scripta* 17 (1978): 135–36.

D. Lynden-Bell, “Galactic Nuclei as Collapsed Old Quasars,” *Nature* 223 (1969): 690–94.

168

Формула радиуса сферы гравитационного влияния: $Rg = GM/v2$, где M – масса черной дыры, а v – дисперсия, или разброс скоростей звезд в пределах этой сферы, обусловленный как черной дырой, так и самими звездами. На основании наблюдаемых масштабных соотношений между массой черной дыры и распределением скоростей звезд получаем Rg ? 35 $(M/10^9)^{1/2}$ парсек.

169

Объединяя формулу радиуса сферы гравитационного влияния $Rg = GM/v2$ с формулой радиуса Шварцшильда $RS = GM/c2$, получаем $Rg/RS = (c/v)2$, что составляет около 10^6 для массивной галактики, где v = 200–300 км/с.

R.F. Zimmerman, *The Universe in a Mirror: The Saga of the Hubble Space Telescope and the Visionaries Who Built It* (Princeton: Princeton University Press, 2010).

171

Я работал с телескопом «Хаббл», когда он впервые был запущен в космос, и еще много раз в дальнейшем. «Работал» не следует понимать буквально – даже опытные астрономы не могут позволить себе двигать телескоп туда-сюда и смотреть, как в поле зрения появляются тусклые галактики. При стоимости $8 млрд это слишком дорогое оборудование, и риск вызвать его сбой из-за неосторожного пользователя должен быть исключен. После распределения орбит, сопровождающегося яростной конкуренцией, астрономы подают свои списки объектов, и компьютерный алгоритм согласовывает их, так чтобы свести к минимуму расход энергии, изменения инструмента и время на развороты телескопа. Через несколько недель обработанные данные можно скачать с защищенного сайта. Никакой романтики!

Сложности и тонкости неизбежны. Галактики – трехмерные объекты, трехмерные движения тел в пространстве проецируются на двумерную плоскость неба, а щель спектрографа дает лишь одномерный срез дисперсии скоростей. В результате необходимо строить модели на основе данных, делать в ходе анализа различные допущения. По-разному ориентируя щель, можно приблизиться к двумерной карте скоростей, но для этого нужно тратить на каждую галактику много вожделенного времени работы телескопа.

L. Ferrarese and D. Merritt, “Supermassive Black Holes,” *Physics World* 15 (2002): 4–46; and L. Ferrarese and H. Ford, “Supermassive Black Holes in Galactic Nuclei: Past, Present, and Future,” *Space Science Reviews* 116 (2004): 523–624.

R. Bender et al., “HST STIS Spectroscopy of the Triple Nucleus of M31: Two Nested Disks in Keplerian Motion around a Supermassive Black Hole,” *Astrophysical Journal* 631 (2005): 280–300.

R. P. van der Marel, P. T. de Zeeuw, H.-W. Rix, and G.D. Quinlan, “A Massive Black Hole at the Center of the Quiescent Galaxy M32,” *Nature* 385 (1997): 610–12.

K. Gebhardt and J. Thomas, “The Black Hole Mass, Stellar Mass-to-Light Ratio, and Dark Halo in M87,” *Astrophysical Journal* 700 (2009): 1690–1701.

M.C. Begelman, R.D. Brandford, and M.J. Rees, “Theory of Extragalactic Radio Sources,” *Reviews of Modern Physics* 56 (1984): 255–351.

R.D. Blandford, H. Netzer, and L. Woltjer, *Active Galactic Nuclei* (Berlin: Springer, 1990).

M.C. Begelman and M.J. Rees, “The Fate of Dense Stellar Systems,” *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 185 (1978): 847–60; and M.C. Begelman and M.J. Rees, *Gravity’s Fatal Attraction: Black Holes in the Universe* (Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2009).

P. Khare, “Quasar Absorption Lines: an Overview,” *Bulletin of the Astronomical Society of India* 41 (2013): 4–60.

W. L.W. Sargent, “Quasar Absorption Lines and the Intergalactic Medium,” *Physica Scripta* 21 (1980): 753–58.

D.H. Weinberg, R. Dave, N. Katz, and J. Kollmeier, “The Lyman-Alpha Forest as a Cosmological Tool,” in *The Emergence of Cosmic Structure*, AIP Conference Series 666, edited by S. Holt and C. Reynolds, 2003, 157–69.

183

Теория линзирования предполагает получение определенного количества странных изображений, частью увеличенных, частью уменьшенных. Самая распространенная геометрия линзирования дает пару увеличенных изображений и одно уменьшенное, обычно слишком тусклое и не вполне различимое, поэтому просматривается пара изображений. Если линзируемый объект имеет сложное распределение массы, то возможно возникновение большего количества дополнительных изображений: астрономы наблюдали линзированные квазары, повторенные четыре, шесть и даже десять раз. Обзор возникающих феноменов см. в: T. Sauer, “A Brief History of Gravitational Lensing,” Einstein Online, Volume 4, 2010, http://www.einstein-online.info/spotlights/grav_lensing_history.

184

Британский телескоп Шмидта хорошо описал бывший сотрудник Фред Уотсон: *Stargazer: Life and Times of the Telescope* (London: Allen and Unwin, 2004). См. также резюме: https://www.aao.gov.au/about-us/uk-schmidttelescope-history.

Прибор с зарядовой связью, англ. CCD. – *Прим. пер.*

M. Miyoshi et al., “Evidence for a Black Hole from High Rotation Velocities in a SubParsec Region of NGC4258,” *Nature* 373 (1995): 127–29.

A.J. Baarth et al., “Towards Precision Black Hole Masses with ALMA: NGC1332 as a Case Study in Molecular Disk Dynamics,” *Astrophysical Journal* 823 (2016): 5–73.

B.M. Peterson, “The Broad Line Region in Active Galactic Nuclei,” *Lecture Notes in Physics* vol. 693 (Berlin: Springer, 2006), 77–100.

Чтобы надежно оценить массу, нужно учесть много нюансов и преодолеть много сложностей. Быстро движущийся газ, дающий эмиссионные линии, собран в облака, а не распределен равномерно, и облака, имеющие разную плотность и находящиеся на разном расстоянии от черной дыры, генерируют разные эмиссионные линии. Геометрия газа влияет на время запаздывания сигнала. Например, газ, образующий кольцо, имеет параболическую поверхность постоянного времени запаздывания. При более сложной трехмерной геометрии газа усложняется и анализ. Неравномерное распределение переменности, обусловленной превратностями погоды и расписанием работы телескопа, добавляет проблем. До 100 астрономов могут участвовать в одной из таких интенсивных программ по составлению карты отражений, и все ради получения массы нескольких черных дыр.

M.C. Bentz et al., “NGC5548 in a Low-Luminosity State: Implications for the BroadLine Region,” *Astrophysical Journal* 662 (2007): 205–12.

B.M. Peterson and K. Horne, “Reverberation Mapping of Active Galactic Nuclei,” in Planets to Cosmology: Essential Science in the *Final Years of the Hubble Space Telescope*, edited by M. Livio and S. Casertano (Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2004).

Обзор методов: B.M. Peterson, “Measuring the Masses of Supermassive Black Holes,” *Space Science Review* 183 (2014): 253–75. Большое количество данных представлено в: A. Refiee and P.B. Hall, “Supermassive Black Hole Mass Estimates Using Sloan Digital Sky Survey Quasar Spectra at $0.7 < z < 2$,” *Astrophysical Journal Supplements* 194 (2011): 42–58.

193

Для сравнения, мировое потребление энергии составляет около 20 ТВт, что в 10^{26} раз меньше энергии, выделяемой квазаром.

J. Updike, “Ode to Entropy,” in *Facing Nature* (New York: Knopf, 1985).

195

В физике существует фундаментальное различие между тепловыми и нетепловыми процессами. В тепловом процессе физическая система находится в равновесии и имеет специфическую температуру. В этом случае она испускает излучение абсолютно черного тела в широком интервале длин волн, но с четко выраженным пиком, длина волны которого обратно пропорциональна температуре (закон Вина). Если процесс нетепловой, физическая система не уравновешена и не имеет специфической температуры. Она излучает в широком диапазоне, и энергия в спектре обычно распределена по степенному закону. Примером нетеплового излучения является синхротронное излучение активных галактик и квазаров.

A. Prieto, “Spectral Energy Distribution Template of Redshift-Zero AGN and the Comparison with that of Quasars,” in *Astronomy at High Angular Resolution*, Journal of Physics Conference Series, vol. 372 (London: Institute of Physics, 2012), 1–5.

X. Barcons, *The X-Ray Background* (Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1992).

A. Moretti et al., “Spectrum of the Unresolved Cosmic X-Ray Background: What is Unresolved 50 Years after its Discovery?” *Astronomy and Astrophysics* 548 (2012): 87–99.

199

Некоторые самые распространенные заблуждения подробно разбирает Фил Плейт, он же «Плохой астроном», в своем блоге для Discover, http://blogs.discovermagazine.com/badastronomy/2008/10/30/ten-things-you-dont-know-aboutblack-holes/-.WEoS2horJdg.

B.J. Carr and S. Hawking, “Black Holes in the Early Universe,” *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 168 (1974): 399–415.

201

Планковское время относится к системе единиц, часто использующейся в физике частиц и космологии, где измерения полностью даются в фундаментальных постоянных, а не изобретенных человеком конструктах. При расчетах в планковских единицах принято присваивать физическим константам значение 1. Планковские единицы описывают ситуацию, когда невозможно объединить стандартную квантовую теорию и общую теорию относительности и необходима квантовая теория гравитации. Это происходит при планковской энергии 10^{19} ГэВ.

В качестве альтернативы гипотетической темной материи можно было бы утверждать, что закон тяготения Ньютона некорректен. Если сила гравитации не строго обратно пропорциональна квадрату расстояния, можно обойтись и без темной материи. Однако за это придется дорого заплатить. Закон тяготения Ньютона является предпосылкой объяснения слабой гравитации в Солнечной системе и за ее пределами, и его изменение уничтожает симметрию и стройность теории. Разрабатывались альтернативные теории гравитации, но ни одна не отвечает высоким стандартам, заданным теорией Ньютона. Астрономы согласились считать темную материю главным компонентом Вселенной, и на выяснение ее природы направлены большие усилия.

P. Pani and A. Loeb, “Exclusion of the Remaining Mass Window for Primordial Black Holes as the Dominant Constituent of Dark Matter,” *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics*, issue 6 (2014): 26.

S. Singh, *Big Bang: The Origin of the Universe* (New York: Harper Perennial, 2005).

J. Miralda-Escude, “The Dark Age of the Universe,” *Science* 300 (2003): 1904–09.

A. Loeb, “The Habitable Epoch of the Early Universe,” *International Journal of Astrobiology* 13 (2014): 337–39.

207

Хотя астрономы не знают физической природы темной материи, имеется большое количество свидетельств существования невидимой массы повсюду во Вселенной и того, что масса удерживает галактики от распада. Если исключить из модели темную материю, моделирование процессов структурообразования не дает ничего похожего на настоящую Вселенную. Это должна быть «холодная темная материя», где «холодная» означает, что во время формирования стабильных атомов частицы двигались с нерелятивистскими скоростями (в противном случае структуры разрушались бы). Основополагающая статья: G.R. Blumenthal et al., “Formation of Galaxies and Large-Scale Structures with Cold Dark Matter,” *Nature* 31 (1984): 517–25.

V. Bromm et al., “Formation of the First Stars and Galaxies,” *Nature* 459 (2009): 49– 54; and A. Loeb, *How Did the First Stars and Galaxies Form* (Princeton: Princeton University Press, 2010).

D.G. York et al., “The Sloan Digital Sky Survey: Technical Summary,” *Astronomical Journal* 120 (2000): 1579–87.

E. Chaffau et al., “A Primordial Star in the Heart of the Lion,” *Astronomy and Astrophysics* 542 (2012): 51–64.

Cosmos Redshift 7. – *Прим. пер.*

G. Schilling, *Flash! The Hunt for the Biggest Explosions in the Universe* (Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2002).

R.W. Klebasadel, I.B. Strong, and R.A. Olsen, “Observations of Gamma Ray Bursts of Cosmic Origin,” *Astrophysical Journal Letters* 182 (1973): L85–89.

J.S. Bloom et al., “Observations of the Naked Eye GRB080319B: Implications of Nature’s Brightest Explosion,” *Astrophysical Journal* 691 (2009): 723–37.

N. Tanvir et al., “A Gamma Ray Burst at a Redshift of z = 8.2,” *Nature* 461 (2009): 1254–57.

Multiple Mirror Telescope. Название обусловлено тем, что первоначально основное зеркало телескопа состояло из шести меньших зеркал; в настоящее время оно заменено одним зеркалом с сотоподобной структурой облегченной массы. – *Прим. пер.*

217

Для охоты за гамма-всплесками нужна сеть телескопов, чтобы самый большой из них в условиях хорошей погоды мог искать оптический компонент. Это захватывающая, но малопродуктивная работа. Из более чем 5000 гаммавсплесков за последние 15 лет менее 20 наблюдались достаточно оперативно или имели достаточно яркий оптический компонент, что дает возможность измерить красное смещение.

N. Gehrels and P. Meszaros, “Gamma Rays Bursts,” *Science* 337 (2012): 932–36.

S. Dong et al., “ASASSN-15lh: A Highly Super-Luminous Supernova,” *Science* 351 (2016): 257–60.

A.L. Melott et al., “Did a Gamma Ray Burst Initiate the Late Ordovician Mass Extinction?” *International Journal of Astrobiology* 3 (2004): 55–61. См. также: B.C. Thomas et al., “Gamma Ray Bursts and the Earth: Exploration of Atmospheric, Biological, Climatic, and Biogeochemical Effects,” *Astrophysical Journal* 634 (2005): 509–33.

V.V. Hambaryan and R. Neuhauser, “A Galactic Short Gamma Ray Burst as Cause for the Carbon-14 Peak in AD774/775,” *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 430 (2013): 32–36.

На самом деле с однозначностью этой интерпретации согласны далеко не все. – *Прим. науч. ред.*

223

Физическая природа ультраярких источников рентгеновского излучения противоречива. Это могут быть черные дыры в процессе аккреции, но некоторые из них, возможно, являются аккрецирующими нейтронными звездами. Кроме того, теоретики разработали схемы, согласно которым черные дыры могут являться «двигателями с принудительной подачей топлива», следовательно, излучать больше предела Эддингтона, что, в свою очередь, означало бы, что черная дыра может быть не особенно массивной. Свидетельство того, что ультраяркий рентгеновский источник в ближней галактике M82 является черной дырой промежуточной массы: D.R. Pasham, T.E. Strohmayer, and R.F. Mushotzky, “A 400-SolarMass Black Hole in the Galaxy M82,” *Nature* 513 (2014): 74–76.

D.H. Clark, *The Quest for SS433* (New York: Viking, 1985).

I.F. Mirabel and R.F. Rodriguez, “Microquasars in our Galaxy,” *Nature* 392 (1998): 673–76.

L. Ferrarese and D. Merritt, “A Fundamental Relation Between Supermassive Black Holes and Their Host Galaxies,” *Astrophysical Journal Letters* 539 (2000): L9–12; and K. Gebhardt et al., “A Relationship Between Nuclear Black Hole Mass and Galaxy Velocity Dispersion,” *Astrophysical Journal Letters* 539 (2000): L13–16. Дженни Грин с коллегами распространили отношение на карликовые галактики малой массы – как активные, так и неактивные.

Балдж – центральное уплотнение в звездных дисках спиральных и линзовидных галактик. – *Прим. науч. ред.*

T. Oka et al., “Signature of an Intermediate-Mass Black Hole in the Central Molecular Zone in our Galaxy,” *Astrophysical Journal Letters* 816 (2015): L7–12.

R. Geroch, *General Relativity from A to B* (Chicago: University of Chicago Press, 1981). Превосходная подборка статей ознакомительного уровня: http://www.einstein-online.info/.

230

Сайт, отслеживающий 500 самых быстрых в мире компьютеров и другие тенденции изменения вычислительных ресурсов и возможностей: https://www.top500.org/.

M.W. Choptuik, “The Binary Black Hole Grand Challenge Project,” in *Computational Astrophysics*, edited by D.A. Clarke and M.J. West, ASP Conference Series #123, 1997, 305. За этой статьей последовала: J. Baker, M. Campanelli, and C.O. Lousto, “The Lazarus Project: A Pragmatic Approach to Binary Black Hole Evolutions,” *Physical Review* D65 (2002): 044001–16.

J. Healy et al., “Superkicks in Hyperbolic Encounters of Binary Black Holes,” *Physical Review Letters* 102 (2009): 041101–04.

233

Следующая статья не для слабых духом: R. Gold et al., “Accretion Disks Around Binary Black Holes of Unequal Mass: General Relativistic Magnetohydrodynamic Simulations of Postdecoupling and Merger,” *Physical Review* D90 (2014): 104031–45.

234

Я узнал Саймона Уайта с другой стороны, когда он был моим коллегой на астрономическом факультете Аризонского университета. Саймон был большой спец в любой теме в космологии, его знания отличались и широтой, и глубиной. Он умел заразить собеседника своей интуицией физика. После бесед с ним я часто уходил с убеждением, что я умнее, чем есть на самом деле. Некоторые причуды выдавали в нем уроженца Британии. Самая поразительная проявилась однажды вечером, когда я пришел к нему домой на ужин – продуктами мы запаслись в складчину. Когда с едой было покончено, стол и стулья отодвинули в сторону, и Саймон пригласил группу мужчин с колокольчиками на щиколотках, платками на головах, завязанными узлом, и палками в руках. Они сплясали моррис – эта традиция неизменно соблюдается в маленьком городке в Кенте, где родился Саймон, со времен Шекспира. Я вырос в Британии, но не представлял, что увижу моррис в пустыне Сонора.

E. Bertschinger, “Simulations of Structure Formation in the Universe,” *Annual Review of Astronomy and Astrophysics* 36 (1998): 599–654.

Эти методы сокращают вычислительную загрузку для N частиц с N^2 до $N\log N$. Таким образом, в случае миллиона частиц необходимо 6 млн вычислительных операций, а 10 млрд частиц – 10 млн вычислительных операций.

J.J. Monaghan, “Smoothed Particle Hydrodynamics,” *Annual Reviews of Astronomy and Astrophysics* 30 (2002): 543–74.

См. интервью с Саймоном Уайтом: http://www.drillingsraum.com/simonwhite/simon-white-1.html.

V. Springel et al., “Simulations of the Formation, Evolution, and Clustering of Galaxies and Quasars,” *Nature* 435 (2005): 629–36.

M. Vogelsberger et al., “Properties of Galaxies Reproduced by a Hydrodynamical Simulation,” *Nature* 509 (2014): 177–82.

241

См. интервью с Саймоном Уайтом: http://www.drillingsraum.com/simonwhite/simon-white-4.html.

242

Единственными галактиками, видимыми невооруженным глазом, являются спиральная галактика Андромеды, или M31, на севере и Большое и Малое Магеллановы Облака – две карликовые галактики – на юге. Поскольку многие люди живут в больших городах и пригородах и не знают звездного неба, они никогда не видели другой галактики.

E. Banados et al., “An 800-Million-Solar-Mass Black Hole in a Significantly Neutral Universe at a Redshift of 7.5,” *Nature*, December 6, 2017, doi:10.1038/ nature25180. Предыдущий рекордсмен: D.J. Mortlock et al., “A Luminous Quasar at a Redshift of z = 7.085,” *Nature* 474 (2011): 616–19

J.L. Johnson et al., “Supermassive Seeds for Supermassive Black Holes,” *Astrophysical Journal* 771 (2013): 116–25.

A.C. Fabian, “Observational Evidence of AGN Feedback,” *Annual Review of Astronomy and Astrophysics* 50 (2012): 455–89.

Феномен формирования маленьких галактик раньше больших, а черных дыр – в обратном порядке называется космическим даунсайзингом. Он вызван тем, что, согласно принятому представлению об эволюции галактик, маленькие галактики образуются первыми и сливаются в большие. Черные дыры идут другим путем: самые крупные растут быстро, а самые многочисленные, менее крупные, растут медленно и остаются относительно маленькими. Обзор по результатам моделирования см. в: P.F. Hopkins et al., “A Unified, Merger-Driven Model of the Origin of Starbursts, Quasars, the Cosmic X-Ray Background, Supermassive Black Holes, and Galaxy Spheroids,” *Astrophysical Journal Supplement* 163 (2006): 1–49, по результатам наблюдений: M. Volonteri, “The Formation and Evolution of Massive Black Holes,” *Science* 337 (2012): 544–47.

C.H. Lineweaver and T.M. Davis, “Misconceptions About the Big Bang,” *Scientific American*, March 2005, 36–45.

248

См. ответы Неда Райта на часто задаваемые вопросы по космологии: http://www.astro.ucla.edu/~wright/cosmology_faq.html.

N.J. Poplawski, “Cosmology with Torsion: An Alternative to Cosmic Inflation,” *Physics Letters B*694 (2010): 181–85.

R. Pourhasan, N. Afshordi, and R.B. Mann, “Out of the White Hole: A Holographic Origin for the Big Bang,” *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics*, issue 4 (2014): 5–22. Популярная версия и источник цитаты: N. Afshordi, R.B. Mann, and R. Pourhasan, “The Black Hole at the Beginning of Time,” *Scientific American*, August 2014, 37–43.

J. Tanaka, T. Yamamura, and J. Kanzaki, “Study of Black Holes with the Atlas Detector at the LHC,” *European Physical Journal* C41 (2005): 19–33.

CMS Collaboration, “Search for Microscopic Black Hole Signatures at the Large Hadron Collider,” *Physics Letters* B697 (2011): 434–53.

B. Koch, M. Bleicher, and H. Stocker, “Exclusion of Black Hole Disaster Scenarios at the LHC,” *Physics Letters* B672 (2009): 71–76.

См. блог Этана Сигела: http://www.forbes.com/sites/startswithabang/2016/03/11/could-the-lhc-make-an-earth-killing-black-hole/#6b465d245837.

L. Crane and S. Westmoreland, “Are Black Hole Starships Possible?” 2009, https://arxiv.org/abs/0908.1803.

J. Lequeux, *Le Verrier: Magnificent and Detestable Astronomer* (New York: Springer, 2013). Леверье всего на несколько дней опередил с открытием английского астронома Джона Кауча Адамса, хотя последний закончил работу раньше. Леверье был настолько непопулярен как директор Парижской обсерватории, что его лишили должности – но восстановили после того, как его преемник внезапно утонул. Современник сказал о нем: «Не знаю, действительно ли месье Леверье – самый отвратительный человек во Франции, но он, определенно, внушает наибольшее отвращение». Занятная историческая коллизия: за 200 лет до этого Галилей упустил возможность открыть Нептун. В 1613 г. он увидел яркий объект возле Юпитера, но решил, что это звезда. Он даже заметил, что объект слегка движется. Однако следующие ночи выдались пасмурными, и Галилей не смог провести наблюдения, которые с очевидностью показали бы, что он видит планету.

R. Baum and W. Sheehan, *In Search of Planet Vulcan: The Ghost in Newton's Clockwork Machine* (New York: Plenum Press, 1997).

W. Isaacson, *Einstein: His Life and Universe* (New York: Simon & Schuster, 2007).

G. Musser, *Spooky Action at a Distance: The Phenomenon That Reimagines Space and Time– And What It Means for Black Holes, the Big Bang, and Theories of Everything* (New York: Farrar, Straus and Giroux, 2015). См. также более специальную, но выдающуюся книгу: T. Maudlin, *Quantum Non-Locality and Relativity: Metaphysical Intimations of Modern Physics* (Oxford: Wiley – Blackwell, 2011).

R. Oerter, *The Theory of Almost Everything: The Standard Model, the Unsung Triumph of Modern Physics* (New York: Penguin, 2006).

L. Smolin, *Three Roads to Quantum Gravity: A New Understanding of Space, Time, and the Universe* (New York: Basic Books, 2001).

Цит. по: F.S. Perls, *Gestalt Therapy Verbatim* (Gouldsboro, ME: Gestalt Journal Press, 1992).

263

Цит. по: R.P. Feynman, *The Character of Physical Law* (New York: Penguin, 1992).

264

Впервые вычислив эффект в 1911 г., Эйнштейн по ошибке получил при расчетах такой же угол, что и следовал из теории Ньютона. К счастью для него и его репутации, экспедиция по наблюдению отклонения света звезды при прохождении мимо Солнца во время солнечного затмения, запланированная на 1914 г., была отложена из-за начавшейся Первой мировой войны, а наблюдателей, уже прибывших на место, чтобы следить за затмением, взяли в плен российские солдаты. Верный угол отклонения в два раза больше значения, которое дает теория Ньютона.

F.W. Dyson, A.S. Eddington, and C. Davidson, “A Determination of the Deflection of Light by the Sun’s Gravitational Field, from Observations Made at the Total Eclipse of 29 May, 1919,” *Philosophical Transactions of the Royal Society* 220A (1920): 291–333.

A. Calaprice, ed., *The New Quotable Einstein* (Princeton: Princeton University Press, 2005).

A. Einstein, “Lens-Like Action of a Star by the Deviation of Light in the Gravitational Field,” *Science* 84 (1936): 506–07.

L.M. Krauss, “What Einstein Got Wrong,” *Scientific American*, September 2015, 51– 55.

F. Zwicky, “Nebulae as Gravitational Lenses,” *Physical Review* 51 (1937): 290.

D. Walsh, R.F. Carswell, and R.J. Weymann, “0957 + 561 A, B: Twin Quasistellar Objects or Gravitational Lens?” *Nature* 279 (1979): 381–84.

Шкала расстояний – или скорость расширения Вселенной – определяется наклоном соотношения скорости удаления галактики и расстояния до нее, $v = H0\ d$, где v – скорость удаления, d – расстояние, а $H0$ – постоянная Хаббла. Обычно постоянная Хаббла определяется при помощи последовательности перекрывающихся индикаторов расстояния, начиная от параллаксов ближних звезд до сверхновых с эталонной яркостью в максимуме (так называемая лестница расстояний). Определение постоянной Хаббла при помощи гравитационного линзирования является прямым методом и не требует использования «лестницы расстояний». Измерение временного запаздывания в линзируемой системе предполагает измерение разницы длины двух путей. Поскольку все углы в конфигурации также измеряются, получается полная пространственная картина, а следовательно, и соотношение между расстоянием и скоростью или красным смещением.

J.N. Hewitt et al., “Unusual Radio Source MG 1131 + 0456: A Possible Einstein Ring?”*Nature* 333 (1988): 537–40.

Имеется третий тип гравитационного линзирования, в котором свет дальних галактик слегка искажается всей темной материей по линии обзора. Представьте себе Вселенную как кривое зеркало, в котором свет идет не по прямому пути, а по слегка извилистому – из-за широко распространенной темной материи. В отдельной галактике искажение составляет всего 0,1 % и слишком мало для обнаружения, но проявляется при поиске закономерностей в формах тысяч тусклых галактик. Поэтому этот тип называется статистическим линзированием. Статистическое линзирование показывает, что пространство между галактиками заполнено темной материей.

U.I. Uggerhoj, R.E. Mikkelsen, and J. Faye, “The Young Center of the Earth,” *European Journal of Physics* 37 (2016): 35602–10.

C.M. Will, “The Confrontation Between General Relativity and Experiment,” *Living Reviews in Relativity* 9 (2006): 3–90.

R.V. Pound and G.A. Rebka, Jr., “Apparent Weight of Photons,” *Physical Review Letters* 4 (1960): 337–41.

J.C. Hafele and R.E. Keating, “Around the World Atomic Clocks: Observed Relativistic Time Gains,” *Science* 177 (1972): 168–70.

R. F.C. Vessot et al., “Test of Relativistic Gravitation with a Space-Borne Hydrogen Maser,” *Physical Review Letters* 45 (1980): 2081–84.

H. Muller, A. Peters, and S. Chu, “A Precision Measurement of the Gravitational Redshift by Interference of Matter Waves,” *Nature* 463 (2010): 926–29.

R. Wojtak, S.H. Hansen, and J. Hjorth, “Gravitational Redshift of Galaxies in Clusters as Predicted by General Relativity,” *Nature* 477 (2011): 567–69.

L. Huxley, *The Life and Letters of Thomas Henry Huxley* (London: Mac-Millan, 1900), 189.

I.I. Shapiro et al., “Fourth Test of General Relativity: New Radar Result,” *Physical Review Letters* 26 (1971): 1132–35.

B. Bertotti, L. Iess, and P. Tortora, “A Test of General Relativity using Radio Links with the Cassini Spacecraft,” *Nature* 425 (2003): 374–76.

E. Teo, “Spherical Photon Orbits around a Kerr Black Hole,” *General Relativity and Gravitation* 35 (2003): 1909–26.

285

У быстро вращающейся черной дыры самая внутренняя устойчивая орбита может находиться внутри фотонной сферы, что означает, что вещество здесь ненаблюдаемо.

C.S. Reynolds and M.A. Nowak, “Fluorescent Iron Lines as a Probe of Astrophysical Black Hole Systems,” *Physics Reports* 377 (2003): 389–466.

Y. Tanaka et al., “Gravitationally Redshifted Emission Implying an Accretion Disk and Massive Black Hole in the Active Galaxy MCG-6–30–15,” *Nature* 375 (1995): 659–61.

J.F. Dolan, “Dying Pulse Trains in Cygnus XR-1: Evidence for an Event Horizon,” *Publications of the Astronomical Society of the Pacific* 113 (2001): 974–82.

N. Shaposhnikov and L. Titarchuk, “Determination of Black Hole Masses in Galactic Black Hole Binaries Using Scaling of Spectral and Variability Characteristics,” *Astrophysical Journal* 699 (2009): 453–68.

"Gravitational Vortex Provides New Way to Study Matter Close to a Black Hole," press release, European Space Agency, July 12, 2016, http://sci.esa.int/xmm-newton/58072-gravitational-vortex-provides-new-way-to-studymatter-close-to-a-black-hole/.

A. Ingram et al., “A Quasi-Periodic Modulation of the Iron Line Centroid Energy in the Black Hole Binary H1743–322,” *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 461 (2016): 1967–80.

M. Middleton, C. Done, and M. Gierlinski, “The X-Ray Binary Analogy to the First AGN QPO,” *Proceedings of the AIP Conference on X-Ray Astronomy: Present Status, Multi-Wavelength Approaches, and Future Perspectives* 1248 (2010): 325–28.

293

M.J. Rees, “Tidal Disruption of Stars by Black Holes of 106–108 Solar Masses in Nearby Galaxies,” *Nature* 333 (1988): 523–28. Это была подробная разработка исходной идеи, выдвинутой десятилетием раньше; см.: J.G. Hills, “Possible Power Source of Seyfert Galaxies and QSOs,” *Nature* 254 (1975): 295–98.

S. Gezari, “The Tidal Disruption of Stars by Supermassive Black Holes,” *Physics Today* 67 (2014): 37–42.

E. Kara, J.M. Miller, C. Reynolds, and L. Dai, “Relativistic Reverberation in the Accretion Flow of a Tidal Disruption Event,” *Nature* 535 (2016): 388–90.

G.C. Bower, “The Screams of the Star Being Ripped Apart,” *Nature* 351 (2016): 30–31.

G. Ponti et al., “Fifteen Years of XMM-Newton and Chandra Monitoring of Sgr A*: Evidence for a Recent Increase in the Bright Flaring Rate,” *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 454 (2015): 1525–44.

298

Время показало, что звезда пережила сближение с черной дырой. – *Прим. науч. ред.*

Jacob Aron, “Black holes devour stars in gulps and nibbles,” New Scientist, March 25, 2015, https://www.newscientist.com/article/mg22530144–400-black-holesdevour-stars-in-gulps-and-nibbles/.

Richard Gray, “Echoes of a stellar massacre,” *Daily Mail*, September 16, 2016, http://www.dailymail.co.uk/sciencetech/article-3793042/Echoesstellar-massacre-Gaspsdying-stars-torn-apart-supermassive-black-holesdetected.html.

C. W.F. Everitt, “The Stanford Relativity Gyroscope Experiment: History and Overview,” in *Near Zero: Frontiers in Physics*, edited by J.D. Fairbank et al. (New York: W.H. Freeman, 1989).

302

Gravity Probe B – прекрасный пример упорства и технологического совершенства – что необходимо для многих космических программ. Концепция восходит к теоретической статье, написанной профессором Стэнфорда Леонардом Шиффом в 1957 г. Вместе с профессором МТИ Джорджем Пью они предложили идею NASA в 1961 г., и проект получил первое финансирование в 1964 г. Последовало 40 лет развития технологии и отсрочек из-за программы NASA «Шаттл». Шифф и Пью умерли задолго до запуска спутника в 2004 г.

C. W.F. Everitt et al., “Gravity Probe B: Final Results of a Space Experiment to Test General Relativity,” *Physical Review Letters* 106 (2011): 22101–06.

E.S. Reich, “Spin Rate of Black Holes Pinned Down,” *Nature* 500 (2013): 135.

K. Middleton, “Black Hole Spin: Theory and Observations,” in Astrophysics of Black Hole, *Astrophysics and Space Science Library*, volume 440 (Berlin, Springer, 2016), 99–137.

J. W.T. Hessels et al., “A Radio Pulsar Spinning at 716 Hz,” *Science* 311 (2006): 1901–04.

L. Gou et al., “The Extreme Spin of the Black Hole in Cygnus X-1,” *Astrophysical Journal* 742 (2011): 85–103.

M.J. Valtonen, “Primary Black Hole Spin in OJ 287 as Determined by the General Relativity Centenary Flare,” *Astrophysical Journal Letters* 819 (2016): L37–43.

309

Цит. по: Dennis Overbye, “Black Hole Hunters,” *New York Times*, June 8, 2015, http://www.nytimes.com/2015/06/09/science/blackhole-event-horizon-telescope.html.

A. Ricarte and J. Dexter, “The Event Horizon Telescope: Exploring Strong Gravity and Accretion Physics,” *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 446 (2014): 1973–87.

S. Doeleman et al., “Event-Horizon-Scale Structure in the Supermassive Black Hole Candidate at the Galactic Center,” *Nature* 455 (2008): 78–80.

312

В апреле 2019 г. стало известно, что участники проекта добились первого успеха, получив изображение окрестностей черной дыры в галактике M87. – *Прим. науч. ред.*

T. Johannsen et al., “Testing General Relativity with the Shadow Size of SGR A*,”*Physical Review Letters* 116 (2016): 031101.

F.G. Watson, *Stargazer: The Life and Times of the Telescope* (Cambridge, MA: De Capo Press, 2005).

Не забываем про А. С. Попова, конечно. – *Прим. науч. ред.*

При помощи аналогичного устройства его изобретатель С. П. Лэнгли наблюдал инфракрасное излучение Солнца еще в 1881 г. Первые наблюдения инфракрасного излучения Солнца были проведены в 1800 г. Вильямом Гершелем. – *Прим. науч. ред.*

P. Morrison, “On Gamma-Ray Astronomy,” *Il Nuovo Cimento* 7 (1958): 858–65.

Четыре выдающихся примера: A.A. Abdo et al., “Fermi-LAT Observations of Markarian 421: the Missing Piece of its Spectral Energy Distribution,” *Astrophysical Journal* 736 (2011): 131–53; V.A. Acciari et al., “The Spectral Energy Distribution of Markarian 501: Quiescent State Versus Extreme Outburst,” *Astrophysical Journal* 729 (2011): 2–11; V.S. Paliya,“A Hard Gamma-Ray Flare from 3C279 in December 2013,” *Astrophysical Journal* 817 (2016): 61–75; and S. Soldi et al., “The Multiwavelength Variability of 3C273,” *Astronomy and Astrophysics* 486 (2008): 411–27.

319

С целью аналогии на время отбросим сомнения, примем материалистическое мышление и склад ума и вообразим, что однажды сможем читать мысли на расстоянии.

Гравитационные волны, однако, не формируются, если движение является совершенно симметричным – например, при расширении или сжатии сферы – или вращательно-симметричным, как при вращении диска или сферы вокруг своей оси. Совершенно симметричный коллапс сверхновой или совершенно симметричная вращающаяся нейтронная звезда не излучают гравитационные волны. В научной терминологии третья производная квадрупольного момента в тензоре энергии-импульса должна отличаться от нуля, чтобы система излучала гравитационные волны. Это математический аналог изменения дипольного момента или тока, ведущего к возникновению электромагнитного излучения. Теперь понятно?

P.G. Bergmann, *The Riddle of Gravitation* (New York: Charles Scribner's Sons, 1968).

322

Распространение гравитации и гравитационных волн со скоростью света – это гипотеза. Ни один эксперимент по ее проверке не был однозначно успешным. Очень трудно поставить эксперимент, «отключающий» или резко меняющий гравитацию на удаленном участке, и измерить ее скорость. В Стандартной модели физики частиц гравитация переносится частицей под названием гравитон, перемещающейся со скоростью света. Гравитоны никогда не регистрировались.

A.S. Eddington, “The Propagation of Gravitational Waves,” *Proceedings of the Royal Society of London* 102 (1922): 268–82.

K. Daniel, “Einstein versus the Physical Review,” *Physics Today* 58 (2005): 43–48.

A. Einstein and N. Rosen, “On Gravitational Waves,” *Journal of the Franklin Institute* 223 (1937): 43–54.

Gravity Research Foundation website, http://www.gravityresearchfoundation.org/origins.html.

В книге по астрономии я не стал подкреплять это утверждение экономическими выкладками, но есть достаточно литературы, чтобы подтвердить: хотя тактика тайминга рынка может сработать в некоторых отраслях и в течение кратких периодов, в качестве долгосрочной стратегии она губительна. Бабсону просто повезло – так бывает.

J.L. Cervantes-Cota, S. Galindo-Uribarri, and G.F. Smoot, “A Brief History of Gravitational Waves,” *Universe* 2 (2016): 22–51.

M. Gardner, *Fads and Fallacies in the Name of Science* (New York: Dover, 1957), 93.

Хотя корни в*и*дения Бабсона были псевдонаучными и магическими, в конечном счете это оказалось очень продуктивным. Со временем Фонд изучения гравитации завоевал авторитет у физического сообщества. Конференцию 1957 г. в Чапел-Хилл принято называть конференцией GR1. Она была учреждена как цикл международных конференций, проводимых каждые несколько лет для обсуждения состояния области изучения гравитации и общей теории относительности. Подчеркивая международный характер этой сферы, последние несколько конференций проводились в Индии, ЮАР, Ирландии, Австралии, Мексике, Польше, Нью-Йорке.

Janna Levin, “Gravitational Wave Blues,” https://aeon.co/essays/how-joewebers-gravity-ripples-turned-out-to-be-all-noise.

Идея Вебера была опубликована в: J. Weber, “Detection and Generation of Gravitational Waves,” *Physical Review* 117 (1960): 306–13. Работа его первого действующего регистратора была описана через шесть лет в: J. Weber, “Observations of the Thermal Fluctuations of a Gravitational-Wave Detector,” *Physical Review Letters* 17 (1966): 1228–30.

J. Weber, “Evidence for Discovery of Gravitational Radiation” *Physical Review Letters* 22 (1969): 1320–24, вскоре за ней последовала: J. Weber, “Anisotropy and Polarization in the Gravitational-Radiation Experiments,” *Physical Review Letters* 25 (1970): 180–84.

Я не был знаком с Вебером, но хорошо знаю его жену Вирджинию Тримбл. Она тоже британка, знаток истории астрономии, и время от времени мы подкидываем друг другу загадки астрономии. Во время их долгого брака Вирджиния преподавала в Калифорнийском университете в Ирвине и проводила по полгода там и по полгода на востоке, где преподавал Вебер. После его смерти в 2000 г. мы встретились на одной конференции и поговорили о его работе, и я заметил, что это болезненная тема. Она видела, как его чернят и унижают люди, не имеющие представления о том, как упорно он работал над совершенствованием своего метода. Он продолжал свое исследование более 20 лет после прекращения государственного финансирования. По словам Вирджинии, это дорого ему обошлось в физическом и моральном смысле.

J.A. Wheeler, *Geons, Black Holes, and Quantum Foam: A Life in Physics* (New York: Norton, 1998), 257–58.

J.M. Weisberg, D.J. Nice, and J.H. Taylor, “Timing Measurements of the Relativistic Binary Pulsar PSR B1913 + 16,” *Astrophysical Journal* 722 (2010): 1030–34.

337

Двойная система излучает 7 ? 10^{24} Вт гравитационного излучения, и расстояние между двумя нейтронными звездами сокращается на 3,5 м в год. Требуется 300 млн лет, чтобы две нейтронные звезды столкнулись и слились. Даже Солнечная система испускает гравитационное излучение, но намного более слабое – всего 5000 Вт.

Это теоретическое построение, основанное на свойствах гравитационных волн, зарегистрированных при слиянии черных дыр, и на вероятных сценариях формирования, которые могли бы привести к появлению массивных объектов – массивнее любой черной дыры в локальной Вселенной. Массивные звезды, образовавшиеся 11 млрд лет назад, должны были содержать намного меньше тяжелых элементов, чем Солнце. Кроме того, судя по моделям, их начальная масса могла быть больше, чем у ныне формирующихся звезд. В результате эти древние звезды потеряли бы меньше массы и оставили после себя более массивные черные дыры. Этот сценарий описан в: K. Belczynski, D.E. Holz, T. Bulik, and R. O'Shaughnessy, "The First Gravitational-Wave Source from the Isolated Evolution of Two Stars in the 40–100 Solar Mass Range," *Nature* 534 (2016): 512–15. Более радикальный вариант, не опровергаемый данными, подразумевает, что черные дыры были первичными, сформировавшимися в ранней Вселенной из темной материи; см.: S. Bird et al., "Did LIGO Detect Dark Matter," *Physical Review Letters* 116 (2016): 201301–07.

J. Chu, “Rainer Weiss on LIGO’s Origins,” oral history, Massachusetts Institute of Technology Q & A News series, http://news.mit.edu/2016/rainerweiss-ligo-origins-0211.

Вайсс отмечает своих студентов, а также Филипа Чапмена, исследователя из МТИ, который перешел работать в NASA и затем перестал заниматься гравитацией и физикой. Любопытно, что предшественником в разработке интерферометра был Джозеф Вебер, предложивший идею своего бывшего студента Роберта Форварда в 1964 г. Форвард построил прототип прибора с плечами длиной 8,5 м на деньги своего работодателя Hughes Research Lab. После 150 часов наблюдений он ничего не зарегистрировал. В подтверждение того, что сообщество физиков, изучающих гравитацию, является «большой деревней», Форвард отмечает значение обсуждений с Райнером Вайссом в примечании к своей статье: R.L. Forward, “Wide-Band Laser-Interferometer GravitationalRadiation Experiment,” *Physical Review* D17 (1978): 379–90.

R. Weiss, “Quarterly Progress Report, Number 102, 54–76,” Research Laboratory of Electronics, MIT, 1972, http://dspace.mit.edu/bitstream/handle/1721.1/RLE_QPR_105_V.pdf?sequence=1.

LIGO (англ. Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory) – лазерно-интерферометрическая гравитационно-волновая обсерватория. – *Прим. ред.*

343

Цит. по: J. Levin, *Black Hole Blues and Other Songs from Outer Space* (New York: Knopf, 2016).

Цит. по: N. Twilley, “Gravitational Waves Exist: The Inside Story of How Scientists Finally Found Them,” *New Yorker*, February 11, 2016, http://www.newyorker.com/tech/elements/gravitational-waves-exist-heres-howscientists-finally-found-them.

Если точнее, они были лучшими в Соединенных Штатах. Рассказывая главным образом о LIGO, я для простоты повествования не освещал довольно серьезные ранние начинания других групп и стран. Группа Древера в университете Глазго продолжила работу над интерферометрами после его перехода в Калтех. Тем временем в Германии группа во главе с Петером Кафкой узнала о работе Вайсса в 1974 г. и наняла одного из его студентов для постройки интерферометров. Совместно с итальянской группой в течение следующего десятилетия были созданы трехметровый и 30-метровый прототипы. Что показательно, ведь получается, что сфера исследования гравитационных волн – это «большая деревня»: Древер услышал об интерферометрах на лекции Петера Кафки в 1975 г. Немецкая и шотландская группы, объединившись, предложили в середине 1980-х гг. проект инструмента километрового масштаба, но не получили финансирования. Со временем им удалось построить 600-метровый инструмент, начавший работать в 2001 г. и ставший главным испытательным полигоном детекторов и методов LIGO. Французы разрабатывали еще более масштабные проекты интерферометров под руководством Алана Брилле, в начале 1980-х гг. работавшего вместе с Вайссом в МТИ. Проект Virgo начал получать данные в 2004 г., и в течение десятилетия это был партнерский проект с LIGO. Подробнее о попытках мирового научного сообщества зарегистрировать гравитационные волны: J.L. CervantesCota, S. Galindo-Uribarri, and G.F. Smoot, “A Brief History of Gravitational Waves,” *Universe* 2 (2016): 22–51.

P. Linsay, P. Saulson, and R. Weiss, “A Study of a Long Baseline Gravitational Wave Antenna System,” 1983, https://dcc.ligo.org/public/0028/T830001/000/NSF_bluebook_1983.pdf.

347

Отчеты и информационные рассылки LIGO не передают всего напряжения. Они выдержаны по большей части в напутственном тоне – уместном, поскольку проект в конце концов увенчался успехом. Лучшее описание происходящего и взгляд изнутри и снаружи см. в книге Джэнны Левин: *Black Hole Blues and Other Songs from Outer Space* (New York: Knopf, 2016).

A. Cho, “Here is the First Person to Spot Those Gravitational Waves,” *Science*, February 11, 2016, http://www.sciencemag.org/news/2016/02/here-sfirst-person-spotthose-gravitational-waves.

Цит. в: Josh Rottenberg, “Meet the Astrophysicist Whose 1980 Blind Date Led to Interstellar,” *Los Angeles Times*, November 21, 2014, http://www.latimes.com/local/great-reads/la-et-c1-kip-thorne-interstellar-20141122-story.html.

Научная преемственность существует в любой сфере, но особенно сильна в теоретической физике и математике. Успешной карьере способствуют два фактора – правильный научный руководитель и студенты, следующие его советам. В теоретических областях влияние руководителя может быть таким сильным, что проявляется даже во «вкусе» в выборе проблемы для изучения и в «стиле» ее решения. Постороннему эти эстетические соображения часто не очевидны. Кип Торн в бытность профессором Калтеха подготовил пять будущих докторов философии, в том числе многих видных деятелей теоретической астрофизики и относительности – например, Алана Лайтмана, Билла Пресса, Дона Пейджа, Сола Тьюколски и Клиффорда Уилла.

"How Are Gravitational Waves Detected?" Q & A with Rainer Weiss and Kip Thorne, *Sky and Telescope*, August 28, 2016, http://www.skyandtelescope.com/astronomy-resources/astronomy-questions-answers/science-faqanswers/kavlihow-gravitational-waves-detected/.

K.S. Thorne, *Black Holes and Time Warps: Einstein's Outrageous Legacy* (New York: W.W. Norton, 1994).

353

См.: Adam Rogers, “Wrinkles in Spacetime: The Warped Astrophysics of Interstellar,” *Wired*, https://www.wired.com/2014/10/astrophysicsinterstellar-black-hole/.

J. Updike, “Cosmic Gall,” *New Yorker*, December 17, 1960, 36.

355

Перевод Г. Варденги.

K.S. Thorne, “Gravitational Radiation,” in *Three Hundred Years of Gravitation*, edited by S. Hawking and W.W. Israel (Cambridge: Cambridge University Press, 1987), 330–458.

357

Эта информация ясно и наглядно изложена в: *LIGO Magazine*, no. 8, March 2016, http://www.ligo.org/magazine/LIGO-magazine-issue-8.pdf.

Это станет решающим преимуществом, поскольку пока невозможно идентифицировать источники сигналов черных дыр, регистрируемых LIGO. Гравитационные волны представляют собой новый способ восприятия Вселенной, поэтому обидно не иметь возможности установить, от каких объектов они исходят, и наблюдать эти объекты во всем спектре электромагнитного излучения. В процессе регистрации есть и другие детали, влияющие на интерпретацию данных. Интерферометры наиболее чувствительны к волнам, приходящим сверху, потому что они сжимаются и растягиваются в поперечной плоскости. Сигнал, поступающий под любым другим углом, более слаб. Два детектора, разделенные несколькими тысячами километров, не лежат в одной плоскости в силу кривизны земной поверхности, и это также следует учитывать. Сигнал наиболее мощный, если плоскость орбиты двойной системы обращена к Земле, при других наклонениях он будет слабее. Эксперименты LIGO должны извлекать из каждого кратковременного события всю информацию до крупицы.

Что касается своеобразной арифметики, описывающей слияние черных дыр, в первом событии участвовала сумма 36 + 29 = 62 солнечных массы, причем три солнечных массы были излучены в форме гравитационных волн. Во втором событии участвовала сумма 14 + 9 = 21 солнечная масса, причем две перешли в гравитационные волны, а в событии-кандидате 23 + 13 = 34 солнечных массы, две из которых были излучены как гравитационные волны. Значимость регистрации трех событий превышала 5,3? в первых двух случаях и имела пограничное значение 1,7? в третьем. Локализация источника в небе зависит от силы сигнала; она составила 230 квадратных градусов в первом событии, 850 квадратных градусов во втором событии и 1600 квадратных градусов в событии-кандидате. В общем, характерная частота, «чирп», зависит от массы черной дыры как $M^{-5/8}$, а смещение в интерферометре, h, как $M5/3$. Эти и другие измерения см. в: *LIGO Magazine*, no. 9, August 2016, http://www.ligo.org/magazine/LIGO-magazine-issue-9.pdf.

360

Прошло всего несколько лет, и наблюдения гравитационных волн стали почти рутиной. – *Прим. науч. ред.*

A. Murguia-Merthier et al., “A Neutron Star Binary Merger Model for GW170817/GRB170817A/SSS17a,” *Astrophysical Journal Letters* 848 (2017): L34–42.

M.R. Seibert et al., “The Unprecedented Properties of the First Electromagnetic Counterpart to a Gravitational-Wave Source,” *Astrophysical Journal Letters* 848 (2017): L26–32.

J. Abadie et al., “Predictions for the Rates of Compact Binary Coalescences Observable by GroundBased Gravitational-Wave Detectors,” *Classical Quantum Gravity* 27 (2010): 173001–26.

Третий этап наблюдений Advanced LIGO начался в апреле 2019 г. и должен продлиться год. Выход на проектную чувствительность ожидается к 2021 г. – *Прим. науч. ред.*

B.P. Abbott et al., “The Rate of Binary Black Hole Mergers Inferred from Advanced LIGO Observations Surrounding GW150914,” *Astrophysical Journal Letters* 833 (2016): L1–99. Advanced LIGO, работающая в связке с европейским интерферометром VIRGO, будет определять местонахождение источников сигналов с точностью до пяти квадратных градусов – в 100 раз точнее, чем при первых регистрациях LIGO.

Изначально LISA был совместным проектом NASA и ЕКА. Первые проектные исследования начались еще в 1980-х гг., но NASA столкнулось с проблемами финансирования и вышло из проекта в 2011 г., а ЕКА из партнера превратилась в единственного участника этой амбициозной программы. LISA – ведущая новая миссия программы ЕКА «Космическое видение» с ориентировочной датой запуска в 2034 г. См.: https://www.elisascience.org/news/top-news/gravitationaluniverseselectedasl3.

M. Armano et al., “Sub-Femto-g Free Fall for Space-Based Gravitational Wave Observatories: LISA Pathfinder Results,” *Physical Review Letters* 116 (2016): 231101–11.

По аналогии со случаем черной дыры звездной массы самым трудным для понимания вопросом являются сроки итогового слияния. Необходимая для слияния сверхмассивных черных дыр потеря момента импульса представляет так называемую проблему «последнего парсека». В богатой газом галактике конечная фаза слияния может занять 10 млн лет, а в галактике, бедной газом, – миллиарды лет. Согласно некоторым моделям, она может превысить возраст Вселенной, из чего следует, что массивные галактики могут содержать двойные сверхмассивные черные дыры, которые никогда не сольются, – что, в свою очередь, означает отсутствие сигнала гравитационной волны, который мы могли бы зарегистрировать.

J. Salcido et al., “Music from the Heavens: Gravitational Waves from Supermassive Black Hole Mergers in the EAGLE Simulations,” *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 463 (2016): 870–85.

G. Hobbs, “Pulsars as Gravitational Wave Detectors,” in *High Energy Emission from Pulsars and Their Systems*, Astrophysics and Space Science Proceedings (Berlin: Springer, 2011), 229–40.

S.R. Taylor et al., “Are We There Yet? Time to Detection of Nano-Hertz Gravitational Waves Based on Pulsar-Timing Array Limits,” *Astrophysical Journal Letters* 819 (2016): L6–12.

A. Guth, *The Inflationary Universe: The Quest for a New Theory of Cosmic Origins* (New York: Perseus, 1997).

P.D. Lasky et al., “Gravitational Wave Cosmology Across 29 Decades in Frequency,”*Physical Review* X 6 (2016): 011035–46.

На языке науки этот паттерн называется B-модой поляризации: соответствующий рисунок электромагнитного поля состоит из наложенных завитков. Температура микроволнового фона одинакова по всему небу с точностью до одной стотысячной, поляризованный сигнал в 100 раз слабее, и регистрация эффекта гравитационных волн требует исключительной точности.

D. Hanson et al., “Detection of B-Mode Polarization in the Cosmic Microwave Background with Data from the South Pole Telescope,” *Physical Review Letters* 111 (2014): 141301–07.

Фермионы – частицы с полуцелым спином, обладающие статистическими характеристиками, – были описаны Энрико Ферми и Полем Дираком в 1930-е гг. Никакие два фермиона не могут обладать одинаковыми квантовыми свойствами. К фундаментальным фермионам относятся электрон и шесть типов кварков, к составным – протоны и нейтроны. Бозоны – частицы с целым спином и статистическими характеристиками, сформулированными Альбертом Эйнштейном и Шатьендранатом Бозе в 1920-е гг. Фундаментальные бозоны – это фотон, бозон Хиггса и (пока гипотетический) гравитон. Составные бозоны – это, например, ядро гелия и ядро углерода. Бозоны в любом количестве могут иметь одинаковое квантовое состояние. Фермионы считаются частицами, а бозоны – переносчиками взаимодействий, однако в квантовой механике между этими двумя категориями нет четкой границы.

377

Следует отметить, что идея существования дополнительных измерений необязательно является поводом сомневаться в теории струн как способе описания природы. Математические аспекты многомерных пространств были проработаны в середине XIX в. Гауссом и Бойяи. В 1920-х гг. Калуца и Клейн создали раннюю теорию гравитации, включающую дополнительное измерение. Теория струн остается очень активной областью теоретической физики, где есть и прогресс, и регресс. Чтобы взглянуть на положительные аспекты теории струн и увидеть ее красоту и потенциал в качестве «теории всего», см.: B. Greene, *The Elegant Universe: Superstrings, Hidden Dimensions, and the Quest for the Ultimate Theory* (New York: W.W. Norton, 2003). Противоположный взгляд: L. Smolin*, The Trouble with Physics: The Rise of String Theory, the Fall of a Science, and What Comes Next* (New York: Houghton Mifflin, 2006).

378

В невращающейся черной дыре сингулярность является точкой, во вращающейся – кольцом. У физика кольцеобразная сингулярность вызывает не большее отторжение, чем точечная, поскольку сохраняет бесконечное искривление пространственно-временного континуума в каждой точке окружности.

J. Womersley, “Beyond the Standard Model,” *Symmetry*, February 2005, 22–25. Несколько более специализирующаяся на технических аспектах статья с таким же названием: J.D. Lykken, “Beyond the Standard Model”, это лекция, прочитанная в рамках Европейской школы физики высоких энергий 2009 г., *CERN Yellow Report CERN-2010–0002* (Geneva: CERN, 2011), 101–09.

L. Randall and R. Sundrum, “An Alternative to Compactification,” *Physical Review Letters* 83 (1999): 4690–93.

L. Randall, *Warped Passages: Unraveling the Mysteries of the Universe's Hidden Dimensions* (New York: Ecco, 2005).

M. Holloway, “The Beauty of Branes,” *Scientific American* 293, November 2005, 38–40.

L. Randall, “Theories of the Brane,” *in The Universe: Leading Scientists Explore the Origin, Mysteries, and Future of the Cosmos*, edited by J. Brockman (New York: HarperCollins, 2014), 62–78.

e. e. cummings, “Pity this busy monster, manunkind,” in e. e. cummings: *Complete Poems 1904–1962* (New York: W.W. Norton, 1944).

J. Neilsen et al., “The 3 Million Second Chandra Campaign on Sgr A*: A Census of X-ray Flaring Activity from the Galactic Center,” in *The Galactic Center: Feeding and Feedback in a Normal Galactic Nucleus*, Proceedings of the International Astronomical Union, vol. 303 (2013): 374–78.

M. Nobukawa et al., “New Evidence for High Activity of the Super-Massive Black Hole in our Galaxy,” *Astrophysical Journal Letters* 739 (2011): L52–56.

F. Nicastro et al., “A Distant Echo of Milky Way Central Activity Closes the Galaxy’s Baryon Census,” *Astrophysical Journal Letters* 828 (2016): L12–20.

“Chandra Finds Evidence for Swarm of Black Holes Near the Galactic Center”.

D. Haggard et al., “The Field X-ray AGN Fraction to z = 0.7 from the Chandra MultiWavelength Project and the Sloan Digital Sky Survey,” *Astrophysical Journal* 723 (2010): 1447–68.

R.P. van der Marel et al., “The M31 Velocity Vector: III. Future Milky Way-M31-M33 Orbital Evolution, Merging, and Fate of the Sun,” *Astrophysical Journal* 753 (2012): 1–21.

T.J. Cox and A. Loeb, “The Collision Between the Milky Way and Andromeda,” *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 386 (2007): 461–74.

392

Изучение M31 осложнено наличием двойного ядра в плотном звездном скоплении. Более яркое из двух скоплений смещено от центра галактики, а менее яркое, отстоящее на пять световых лет, содержит массивную черную дыру. Из-за удаленности 2,5 млн световых лет области ядер трудно изучать в деталях даже с помощью космического телескопа «Хаббл». Самое точное измерение массы черной дыры дает диапазон от 110 до 230 млн солнечных масс. См.: R. Bender et al., “HST STIS Spectroscopy of the Triple Nucleus of M31: Two Nested Disks in Keplerian Rotation Around a Supermassive Black Hole,” *Astrophysical Journal* 631 (2005): 280–300.

J. Dubinski, “The Great Milky Way-Andromeda Collision,” *Sky and Telescope*, October 2006, 30–36. Статья более специального характера: F.M. Khan et al., “Swift Coalescence of Supermassive Black Holes in Cosmological Mergers of Massive Galaxies,” *Astrophysical Journal* 828 (2016): 73–80. Как именно теоретически происходит итоговое слияние, точно не известно; см.: M. Milosavljevic and D. Merritt, “The Final Parsec Problem,” in The Astrophysics of Gravitational Wave Sources, AIP Conference Proceedings, vol. 686 (2003): 201–10.

F. Khan et al, “Swift Coalescence of Supermassive Black Holes in Cosmological Mergers of Massive Galaxies,” *Astrophysical Journal* 828 (2016): 73–81.

T. Liu et al., “A Periodically Varying Luminous Quasar at $z = 2$ from the PAN-STARRS1 Medium Deep Survey: A Candidate Supermassive Black Hole in the Gravitational Wave-Driven Regime,” *Astrophysical Journal Letters* 803 (2015): L16–21.

K. Thorne, *The Science of Interstellar* (New York: W.W. Norton, 2014).

W. Zuo et al., “Black Hole Mass Estimates and Rapid Growth of Supermassive Black Holes in Luminous $z = 3.5$ Quasars,” *Astrophysical Journal* 799 (2014): 189–201.

G. Ghisellini et al., “Chasing the Heaviest Black Holes of Jetted Active Galactic Nuclei,” *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 405 (2010): 387–400.

K. Inayoshi and Z. Haiman, “Is There a Maximum Mass for Black Holes in Galactic Nuclei?”, *Astrophysical Journal* 828 (2016): 110–17.

D. Sobral et al., “Large H-Alpha Survey at $z = 2.23$, 1.47, 0.84, and 0.40: The 11 Gyr Evolution of Star-forming Galaxies from HiZELS,” *Monthly Notice of the Royal Astronomical Society* 428 (2013): 1128–46.

F.C. Adams and G. Laughlin, “A Dying Universe: The Long Term Fate and Evolution of Astrophysical Objects,” *Reviews of Modern Physics* 69 (1997): 337–72.

A. Burgasser, “Brown Dwarfs: Failed Stars, Super Jupiters,” *Physics Today*, June 2008, 70–71.

D.N. Spergel, “The Dark Side of Cosmology: Dark Matter and Dark Energy,” *Science* 347 (2015): 1100–02.

404

Астрономы задумывались о том, как будущие обитатели Млекомеды смогут узнать, что живут в расширяющейся Вселенной в отсутствии видимых галактик, по которым можно было бы измерить красное смещение. Через триллион лет расширение достигнет таких масштабов, что микроволновое излучение, оставшееся после Большого взрыва, уйдет за горизонт событий. Похоже, единственным свидетельством наличия Вселенной за пределами Млекомеды будут сверхбыстрые звезды, постоянно выбрасываемые из Млекомеды и всех остальных галактик с околосветовыми скоростями. Эта возможность описана в статье: A. Loeb, “Cosmology with Hypervelocity Stars,” *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics* 4 (2011): 23–29.

F. Adams and G. Laughlin, *The Five Ages of the Universe* (New York: Free Press, 1999).

H. Nishino, Super-K Collaboration, “Search for Proton Decay in a Large Water Cerenkov Detector,” *Physical Review Letters* 102 (2012): 141801–06.

J. Baez, “The End of the Universe,” http://math.ucr.edu/home/baez/end.html.

W.B. Yeats, “The Second Coming” (1919), in *The Classic Hundred Poems* (New York: Columbia University Press, 1998).

A. Eddington, *The Nature of the Physical World: Gifford Lectures of 1927* (Newcastleupon-Tyne: Cambridge Scholars, 2014).

B.W. Jones, *Life in Our Solar System and Beyond* (Berlin: Springer, 2013).

411

The Extrasolar Planets Encyclopedia is continuously updated, http://exoplanet.eu/.

R. Jayawardhana, *Strange New Worlds: The Search for Alien Planets and Life Beyond our Solar System* (Princeton: Princeton University Press, 2013).

A. Cassan et al., “One or More Bound Planets per Milky Way Star from Microlensing Observations,” *Nature* 481 (2012): 167–69.

F.J. Dyson, “Time Without End: Physics and Biology in an Open Universe,” *Reviews of Modern Physics* 51 (1979): 447–60.

M. Bhat, M. Dhurandhar, and N. Dadhich, “Energetics of the Kerr-Newman Black Hole by the Penrose Process,” *Journal of Astronomy and Astrophysics* 6 (1985): 85– 100.

T. Opatrny, L. Richterek, and P. Bakala, “Life Under a Black Sun,” 2016, https://arxiv.org/abs/1601.02897.

F.J. Dyson, “Search for Artificial Stellar Sources of Infra-Red Radiation,” *Science* 131 (1960): 1667–68.

Английский язык XI–XV вв. – *Прим. пер.*